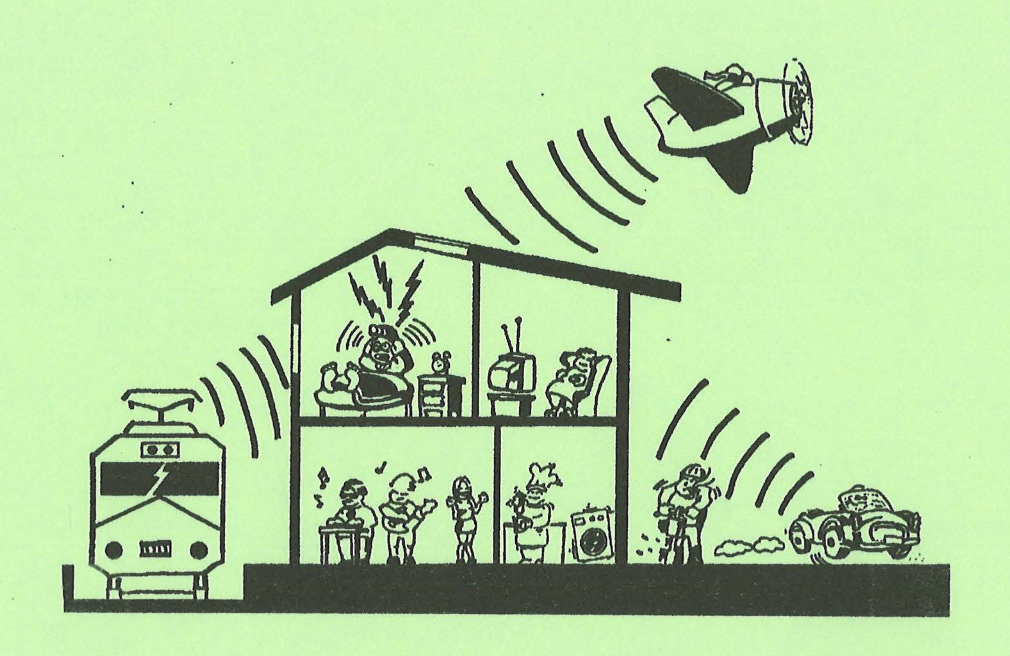
EL AISLAMIENTO ACÚSTICO (II)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

3-51-11

EL AISLAMIENTO ACÚSTICO (II)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

3-51-11

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

I *El aislamiento acústico (II)*

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestiòn y portada : Nadia Soddu.
CUADERNO 296.01 / 3-51-11
ISBN: 978-84-9728-320-5 (obra completa)
ISBN-13: 978-84-9728-322-9
Depósito Legal: M- 5048-2010

ÍNDICE

4.- EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO Y SUS MAGNITUDES CARACTERISTICAS

4.1 Introducción
4.2 Magnitudes que expresan el aislamiento acústico a ruido aéreo.
4.2.1 Magnitudes que expresan las características de los elementos constructivos
4.2.2 Magnitudes que expresan las características de los recintos.
4.2.3 Magnitudes que expresan el aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas
4.3 Índices globales de valoración del aislamiento acústico a ruido aéreo.
4.3.1 Índices globales ponderados A, según el DB HR Protección frente al ruido del CTE.
4.3.2 Procedimiento para la evaluación de las magnitudes globales, según la Norma UNE-EN ISO 717-1. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento al ruido aéreo.
4.4 Ejemplos de cálculo de aislamiento al ruido aéreo.

Bibliografía.

5.- AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE UNA HOJA

5.1.- Introducción
5.2.- Aislamiento a ruido aéreo de elementos constructivos simples de una hoja.
5.3.- Índice de reducción acústica de elementos estructurales monolíticos.
5.4.- Estimación del índice ponderado de reducción acústica para elementos estructurales monolíticos a partir de su masa por unidad de superficie.
5.5.- Método empírico aproximado para estimar el índice de reducción acústica de sistemas constructivos de una hoja.
5.6.- El aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos mixtos.
5.7.- Paneles laminados.
5.8.- Transmisión del sonido en placas ortótropas.
5.8.1.- Paneles con nervaduras rigidizadas.
5.9.- Mejora del índice ponderado de reducción acústica de recubrimientos.
5.10 - Influencia de agujeros, grietas, fisuras en el índice de reducción acústica de un sistema constructivo.
5.11.- Los ensayos de laboratorio y su reproducibilidad.

Bibliografía.

4.- EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO Y LAS MAGNITUDES QUE LE CARACTERIZAN

4.1- INTRODUCCIÓN

Para el estudio del aislamiento acústico es importante tener un conocimiento básico del sonido en los recintos y saber que magnitudes son relevantes en la medida y predicción del aislamiento acústico entre recintos. Este tema se dedica al conocimiento y manejo de las magnitudes que son propias del aislamiento acústico a ruido aéreo. Con ello se pretende que los técnicos que intervienen en la edificación (arquitectos, aparejadores, ingenieros, etc.) tengan información de cómo se obtienen los datos de aislamiento a ruido aéreo de los elementos constructivos y entre recintos de acuerdo con las normas UNE EN ISO correspondientes y el DB HR Protección frente al ruido del CTE.

El aislamiento acústico tiene por objeto el proteger un ambiente acústico contra la penetración de sonidos no deseados, dificultando su propagación. El aislamiento acústico a ruido aéreo de un elemento constructivo o cerramiento que separa dos ambientes acústicos, se define como la capacidad de reducir la energía acústica que se propaga por vía aérea del ambiente acústico emisor al receptor. En este tema se definirán las magnitudes físicas que son relevantes en la medida y predicción del aislamiento acústico a ruido aéreo de sistemas constructivos, entre los recintos y las fachadas de los recintos.

Según el medio en el que se produce el ruido, este se clasifica en *ruido aéreo*, cuando se genera en el aire (conversación entre personas, instrumentos musicales, ruido de tráfico, etc.) y *ruido estructural*, cuando se genera en un medio sólido (caída de un objeto sobre el suelo, poner un clavo en una pared, pisadas, maquinaria que vibra unida rígidamente a una superficie sólida, etc.). El *ruido de impacto* es un caso particular de ruido estructural.

La transmisión acústica desde el exterior a un recinto de un edificio, entre dos recintos, etc. se produce por diferentes caminos, los directos y los indirectos. *Las transmisiones directas* se realizan únicamente a través del elemento separador. Incluyen las transmisiones del sonido que incidiendo sobre el elemento separador es radiado por este al recinto receptor, y el ruido aéreo transmitido a través de huecos y rendijas en el mismo. Las transmisiones directas dependen básicamente del aislamiento acústico del elemento separador y de su superficie. *Las transmisiones indirectas*, se subdividen en *indirectas por vía sólida o transmisiones por flancos*, (paredes, techos, suelos) e *indirectas por vía aérea* (corredores, techos suspendidos, sistemas de ventilación, etc.). Las transmisiones indirectas dependen de la constitución de las paredes laterales y del tipo de ligazón con el elemento separador.

El sonido entre recintos contiguos se transmite de manera directa través de la pared separadora, camino Dd y por los caminos de flanco: Ff, Df, Fd. El aislamiento acústico a ruido aéreo entre los dos recintos dependerá de la cantidad de energía acústica transmitida por cada uno de los caminos (1 Dd; 4Fd; 4Df; 4Ff).

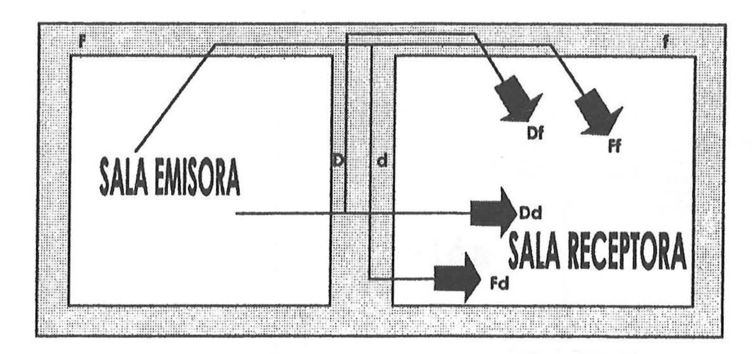


Figura 4.1: Caminos de transmisión acústica del ruido aéreo entre dos recintos.

En los edificios las transmisiones indirectas son importantes, y en algunos casos pueden ser predominantes. El aislamiento acústico entre dos recintos depende de las transmisiones del sonido por cada uno de los caminos de transmisión, su valor estará muy condicionado por el sistema constructivo de menor aislamiento acústico. Las transmisiones indirectas son tanto mayores cuanto más ligeros son los elementos constructivos adyacentes.

4.2.- MAGNITUDES QUE EXPRESAN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Cuando las ondas sonoras inciden sobre un elemento constructivo, este vibra y transmite energía acústica de la misma frecuencia que el sonido incidente. La energía trasmitida por el elemento constructivo depende de la energía incidente y de las características del elemento. Dicho de otra forma, cuando las ondas sonoras inciden sobre el elemento constructivo con una energía E_i, parte de la energía es reflejada E_r , y el resto es absorbida E_a . La energía absorbida es en parte disipada en el elemento constructivo y el resto de la energía es transmitida.

$$E_i = E_r + E_a = E_r + E_d + E_t \tag{4.1}$$

Se define el *coeficiente de transmisión sonora de un elemento constructivo* τ , en una frecuencia o banda de frecuencia, al cociente entre las potencia acústica transmitida a través del elemento y la potencia acústica incidente sobre el.

$$\tau(f,\theta) = \frac{W_{transmitida}}{W_{incidente}} \tag{4.2}$$

El coeficiente de transmisión sonora es función de la frecuencia f, y del ángulo de incidencia θ, medido respecto a la normal a la superficie del elemento divisorio.

4.2.1.- MAGNITUDES QUE EXPRESAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Las magnitudes que caracterizan las propiedades de aislamiento a ruido aéreo de un elemento constructivo se determinan en bandas de tercio de octava y de octava en ensayos realizados en laboratorio en cámaras normalizadas. El montaje se realiza de manera que se pueda garantizar que el sonido se transmite del recinto emisor al receptor a través del elemento constructivo objeto del ensayo.

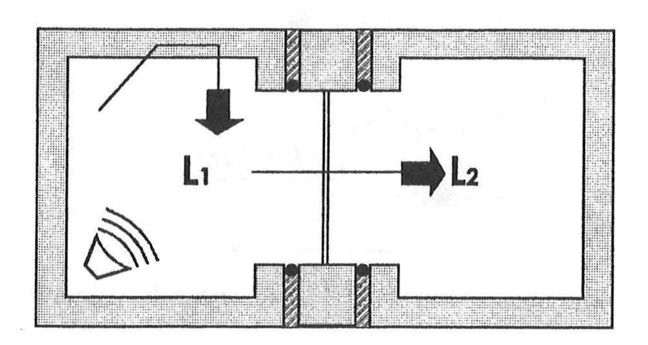


Figura 4.2: En los ensayos en laboratorio, el sonido se transmite del recinto emisor al receptor a través del sistema constructivo que los separa.

Índice de reducción acústica, R

Se define como diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica W_1 incidente sobre un elemento constructivo objeto de ensayo y la potencia acústica transmitida a través del mismo W_2. Esta magnitud se designa por R, se expresa en decibelios y su valor varía con la frecuencia.

$$R = 10.\log\frac{1}{\tau} = 10.\lg\frac{W_1}{W_2} \quad dB \qquad (4.3)$$

En los países anglosajones al índice de reducción sonora R, se suele denominar, *perdidas por transmisión sonora*, TL.

Considerando que los campos acústicos en los recintos emisor y receptor son perfectamente difusos y que el sonido radiado al local receptor se ha transmitido a través de la muestra, se puede probar de acuerdo con la Norma UNE-EN-ISO 140-3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción, el índice de reducción sonora R se evalúa como

$$R = L_1 - L_2 + 10\lg\frac{S}{A} \quad dB \qquad (4.4)$$

donde: L_1 y L_2 son los niveles medios de presión sonora en los recintos emisor y receptor, expresados en dB; S, es el área de la muestra, en m^2; y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.

El término de corrección de la ecuación anterior, se evalúa a partir del tiempo de reverberación medido de acuerdo con la Norma EN-ISO 354 y se determina utilizando la fórmula de Sabine del tiempo de reverberación:

$$A = \frac{0{,}16V}{T} \ \mathrm{m}^2 \qquad (4.5)$$

donde: A, es el área de absorción acústica equivalente, en m^2; V es el volumen del recinto receptor en m^3 y T es el tiempo de reverberación del recinto receptor en segundos.

Deducción de la expresión del índice de reducción acústica R

Se parte de la hipótesis de que los campos sonoros en los recintos emisor y receptor son difusos y que la transmisión del sonido únicamente se realiza a través de la pared separadora de área S, en m^2.

En el recinto emisor hay una fuente sonora que produce un campo sonoro estacionario. La intensidad del campo sonoro reverberante que incide sobre las paredes del recinto emisor es:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{4\rho c} \tag{4.6}$$

La potencia sonora incidente sobre la pared separadora de los recintos es

$$W_1 = I_1.S = \frac{p_1^2 S}{4\rho c} \tag{4.7}$$

En la hipótesis que la transmisión sonora se realiza únicamente a través de la pared de área S, la potencia sonora transmitida al recinto receptor es: $W_2 = S.I_2$

Se considera que se establece el equilibrio entre la energía transmitida por unidad de tiempo y la absorbida por el recinto receptor, que se supone que también tiene un campo sonoro reverberante.

La potencia acústica transmitida al recinto receptor a través de la superficie S debe ser igual a la potencia acústica absorbida en el local receptor es

$$W_2 = I_2.A_2 = \frac{p_2^2}{4\rho c}.A_2 \tag{4.8}$$

De la definición de Índice de reducción sonora (4.3) se obtiene

$$R = 10.\lg\frac{W_1}{W_2} = 10.\lg\frac{\frac{p_1^2.S}{4\rho c}}{\frac{p_2^2.A_2}{4\rho c}} = 10.\lg\frac{p_1^2.S}{p_2^2.A_2} \quad dB$$

$$R = 10.\lg\frac{p_1^2}{p_2^2} + 10.\lg\frac{S}{A_2} \quad dB$$

$$10.\lg\frac{p_1^2}{p_2^2} = 10.\lg\frac{\frac{p_1^2}{p_{ref}^2}}{\frac{p_2^2}{p_{ref}^2}} = 10.\lg\frac{p_1^2}{p_{ref}^2} - 10.\lg\frac{p_2^2}{p_{ref}^2} = L_1 - L_2$$

Al sustituir en la definición del índice de reducción acústica se obtiene la ecuación (4.4)

$$R = L_1 - L_2 + 10.\lg\frac{S}{A_2} \quad dB$$

donde A_2 es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en m^2. Valor que se obtiene a partir de los resultados obtenidos de la medida del tiempo de reverberación de la sala receptora. Su expresión es:

$$A_2 = \frac{0{,}16.V_2}{T_2} \text{ m}^2$$

V_2 es el volumen del recinto receptor en m^3 y T_2 es el tiempo de reverberación del recinto receptor en segundos.

Otro procedimiento alternativo es medir la potencia acústica transmitida al recinto receptor midiendo la intensidad acústica. Mediante este método se determina la intensidad acústica media transmitida sobre una superficie S_R. De acuerdo con la Norma ISO 15186-1. El método de intensidad únicamente necesita de un recinto emisor reverberante, en el recinto receptor, que no debe ser muy reverberante, el nivel de presión sonora promediado a través del elemento separador se mide con un analizador de intensidad.

Índice de reducción acústico intensimétrico R_I

Dada una sala emisora y otra receptora, que bien pudiera ser el exterior, este índice se evalúa teniendo en cuenta que el campo sonoro en la sala emisora se considera difuso, a partir de la ecuación

$$R_I = L_{p1} - 6 - \left[L_{In} + 10\lg(\frac{S_m}{S}) \right] \quad dB \qquad (4.9)$$

donde:

L_{p1} es el nivel promedio de presión sonora en la sala emisora, en dB.

L_{In} es el nivel promedio de intensidad sonora sobre la superficie de medida en la sala receptora, en dB.

S_m es el área total de la(s) superficie(s) de medida, en m^2.

S es el área del elemento que se ensaya, en m^2

¿Se obtienen los mismos resultados mediante los dos procedimientos?

En teoría habrá una diferencia debida a la infravaloración de la potencia transmitida por el método tradicional, pues las mediciones del nivel de presión sonora se realizan en el campo reverberante, a una cierta distancia de las superficies del contorno del recinto receptor.

Si se introduce una corrección, llamada de Waterhouse, en la expresión del índice de reducción acústico intensimétrico R_I, se obtiene la expresión del índice de reducción intensimétrico modificado $R_{I,m}$, más de acuerdo con los valores obtenidos del índice de reducción acústica R según la ISO 140-3.

$$R_{I,m} = R_I + 10.\lg\left[1 + \frac{S_{2t}c}{8Vf}\right] \text{ dB} \qquad (4.10)$$

S_{2t} y V_2 son el área total y el volumen del recinto receptor, y f es la frecuencia central de la banda de frecuencia.

4.2.2 MAGNITUDES QUE EXPRESAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RECINTOS.

De acuerdo con la Norma UNE-EN-ISO 140-4: Medición *in situ* del aislamiento al ruido aéreo entre locales, se definen las magnitudes siguientes:

Diferencia de niveles, D

Es la diferencia, en decibelios, del promedio espacio-temporal de los niveles de presión acústica producidos en los dos recintos para una o varias fuentes de ruido situadas en ellos:

$$D = L_1 - L_2 \quad dB \tag{4.11}$$

L_1 y L_2 son los niveles medios de presión sonora en los recintos emisor y receptor, respectivamente, expresados en dB. En general, si se intercambian los recintos emisor y receptor la diferencia de niveles D no es la misma. A esta magnitud a veces se le suele llamar aislamiento acústico bruto entre recintos. En general esta magnitud es función de la frecuencia.

Diferencia de niveles normalizada, D_n

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10\log\frac{A}{A_0} \quad dB \tag{4.12}$$

L_1 es el nivel medio de presión sonora en el recinto emisor; L_2, es el nivel medio de presión sonora en el recinto receptor; A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en m^2; A_0, es el área de absorción acústica de referencia, en m^2, (para recintos en viviendas o recintos de tamaño comparable: $A_0 = 10\ m^2$).

Diferencia de niveles estandarizada, D_{nT}

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor, se define mediante la expresión:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10\lg\frac{T}{T_0} \quad dB \tag{4.13}$$

L_1 es el nivel medio de presión sonora en el recinto emisor; L_2, es el nivel medio de presión sonora en el recinto receptor; T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia a todas las frecuencias; para viviendas, $T_0 = 0{,}5$ s.

La diferencia de niveles D; la diferencia de niveles normalizada D_n; y la diferencia de niveles estandarizada D_{nT}, en general, varían con la frecuencia del sonido.

Índice de reducción acústica aparente, R′

Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica W_1 incidente sobre la pared de ensayo y la potencia acústica total transmitida al recinto receptor si, además de la potencia sonora W_2 transmitida a través del elemento separador, es significativa la potencia sonora W_3 transmitida a través de elementos laterales o de otros componentes; se expresa en decibelios:

$$R' = 10.\lg \frac{W_1}{W_2 + W_3} \quad dB \tag{4.14}$$

Supuestos los campos acústicos difusos en los recintos emisor y receptor, el índice de reducción sonora aparente R′, se evalúa como

$$R' = L_1 - L_2 + 10\lg \frac{S}{A} \quad dB \tag{4.15}$$

donde: L_1 y L_2 son los niveles medios de presión sonora en los recintos emisor y receptor, expresados en dB; S, es el área de la superficie de separación entre los dos recintos, vista desde el recinto receptor, en m^2; y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.

En el índice de reducción sonora aparente, la potencia sonora transmitida al recinto receptor está relacionada con la potencia sonora incidente sobre elemento constructivo común, con independencia de las condiciones reales de transmisión.

Si los dos recintos tienen la misma área de absorción acústica equivalente, el índice de reducción acústica aparente R′ es independiente del sentido de la transmisión. Si las áreas de absorción acústica equivalentes son diferentes, el índice de reducción acústica aparente es diferente según quien sea el recinto emisor o receptor. La misma fuente sonora emitiendo con el mismo nivel de potencia acústica se percibe de forma diferente según se encuentre situada en uno u otro recinto.

Relación entre los diversos índices

Las diferencias de niveles normalizada y estandarizada están relacionadas con el índice de reducción sonora aparente. En consecuencia al conocer una de las magnitudes anteriores se pueden deducir las otras. Se relacionan de la siguiente manera:

$$D_n = R' + 10.\lg \frac{A_0}{S} = R' + 10.\lg \frac{10}{S} \quad dB \tag{4.16}$$

$$D_{nT} = R' + 10.\lg \frac{0{,}16V}{T_0 S} = R' + 10.\lg \frac{0{,}32V}{S} \quad dB \tag{4.17}$$

V es el volumen del recinto receptor, en m^3.

La expresión (4.17) muestra la influencia que tiene el volumen del recinto receptor y el área de la superficie de separación común entre los dos recintos, la diferencia de niveles estandarizada es diferente según a quien se considere recinto emisor o receptor. Esto se aplica a recintos colindantes vertical u horizontalmente. Esto es de gran importancia

práctica en la aplicación de la legislación española en la edificación DB HR Protección frente al ruido del CTE.

Diferencia de nivel normalizada de un elemento, $D_{n,e}$.

Es la diferencia de nivel de presión acústica, promediada espacial y temporalmente, producida entre dos recintos, con una fuente sonora activa en uno de ellos, y debiéndose la transmisión acústica únicamente a un elemento constructivo pequeño (por ejemplo dispositivos de ventilación, cajón de persiana, conductos para cableado eléctrico, etc.). $D_{n,e}$ se normaliza a un área de absorción acústica equivalente de referencia en el recinto receptor A_0 = 10 m^2. Esta magnitud se determina en laboratorio según la Norma UNE EN 20140 –10.

$$D_{n,e} = L_1 - L_2 - 10\lg\frac{A}{A_0} \quad dB \tag{4.18}$$

A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.

4.2.3.- MAGNITUDES QUE EXPRESAN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS FACHADAS

En las mediciones in situ del aislamiento global a ruido aéreo de fachadas se obtiene el índice de reducción acústica de una fachada en relación a una posición 2 m frente a la fachada. Los métodos globales, pretenden valorar la diferencia de nivel sonoro exterior/interior en las condiciones de tráfico existentes. Los métodos globales más precisos usan el ruido de tráfico como fuente de ruido. Adicionalmente se puede usar un altavoz como fuente sonora artificial. Según la Norma EN ISO 140-5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas, se utilizan las magnitudes siguientes:

Diferencia de niveles, D_{2m}

Es la diferencia, en decibelios, entre el nivel de presión sonora exterior a 2 m frente a la fachada, $L_{1,2m}$ y el valor medio espacio-temporal del nivel de presión sonora L_2, en el interior del local receptor:

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad dB \tag{4.19}$$

Diferencia de niveles normalizada, $D_{2m,n}$

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor:

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 - 10\log\frac{A}{A_0} \quad dB \tag{4.20}$$

A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en m^2; A_0, = 10 m^2 es el área de absorción acústica equivalente de referencia.

Diferencia de niveles estandarizada, $D_{2m,nT}$

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor, se define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10\lg\frac{T}{T_0} \quad dB \qquad (4.21)$$

D_{2m} es la diferencia de niveles; T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia; T_0 = 0,5 s.

Nota: Según el tipo de fuente del ruido (tráfico, trenes, aeronaves o altavoces) en la notación se antepone un subíndice. Por ejemplo para ruido de tráfico $D_{tr,2m,nT}$,, si se usa un altavoz será $D_{ls,2m,nT}$. La notación es semejante para las otras magnitudes. En la práctica $D_{tr,2m,nT} \approx D_{ls,2m,nT}$. dB.

MÉTODO	RESULTADO	CAMPO DE APLICACIÓN
Global con ruido de tráfico	$D_{tr,\,2m,\,nT}$ $D_{tr,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de tráfico.
Global con ruido de trenes	$D_{rt,\,2m,\,nT}$ $D_{rt,\,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de trenes.
Global con ruido de aeronaves	$D_{at,2m,nT}$ $D_{at,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de aeronaves.
Global con altavoz	$D_{ls,\,2m,nT}$ $D_{ls,\,2m,n}$	Método alternativo a los tres anteriores.

Tabla 4.1: Métodos de medición global del aislamiento a ruido aéreo de fachadas.

Debido a su uso, conviene recordar la definición del nivel medio de presión acústica en un recinto:

Nivel medio de presión acústica en un recinto, L_2.

Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre el promedio espacio-temporal de los cuadrados de las presiones sonoras y el cuadrado de la presión sonora de referencia, tomándose el promedio espacial en todo el recinto, con excepción de las zonas en las que la radiación directa de la fuente o el campo próximo de las paredes, el techo, etc., tienen una influencia significativa, se expresa en decibelios.

$$L_2 = 10.\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}10^{0,1L_j}\right) \quad dB \qquad (4.22)$$

donde L_j son los niveles de presión sonora L_1 a L_n en n posiciones diferentes dentro del recinto.

A veces se suelen expresar los resultados del aislamiento acústico en bandas de octava, calculados a partir de los resultados en tercio de octava. La forma de realizarlo es la siguiente: en cada banda de octava se usan los tres tercios de octava comprendidos en la misma, mediante la expresión

$$X_{oct} = -10\log\left(\sum_{n=1}^{3}\frac{10^{-0,1X_{1/3oct}}}{3}\right) \qquad (4.23)$$

donde X es la magnitud utilizada.

4.3.- INDICES GLOBALES DE VALORACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Al ser el aislamiento acústico de un elemento constructivo función de la frecuencia, hay que suministrar un gran número de datos. En acústica de los edificios las frecuencias de interés están entre las bandas de tercio de octava de frecuencias centrales de 100 Hz a 5000 Hz. En España, los datos del aislamiento acústico se realizan en 18 bandas de 1/3 de octava.

Para simplificar el proceso de cálculo se han realizado estudios con fuentes de ruidos típicas en viviendas para obtener índices de valoración globales de una cifra, que especifican de forma efectiva las características de aislamiento acústico en laboratorio de los sistemas constructivos o in situ del aislamiento acústico entre recintos. De ésta forma se simplifica el establecimiento de los valores requeridos en las normativas. Estos índices globales tienen en cuenta las características físicas del ruido y aspectos perceptivos, básicamente de la molestia que producen. Se utilizan en el estudio del aislamiento acústico de ruido aéreo y de ruido de impactos.

Los métodos más utilizados en los países de nuestro entorno, para incluir un índice global de valoración del aislamiento acústico a ruido aéreo son los siguientes:

1) ***Los índices globales ponderados A***, se utilizan habitualmente en Francia y España. El rango de frecuencias de interés está en las bandas de un tercio de octava de frecuencias centrales entre 100 Hz y 5 kHz. Los resultados se expresan en decibelios ponderados A, dBA. Se suelen representar R_A, D_{nTA}, R_{Atr}, D_{nTAtr}, etc.

2) ***Los índices ponderados determinados según los procedimientos de la Norma UNE-EN ISO 717-1***. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento al ruido aéreo. Se basan en la comparación de la curva de aislamiento obtenida con una curva de referencia. Son los índices más utilizados. El rango de frecuencias para su cálculo es habitualmente entre 100 Hz y 3150 Hz para bandas de frecuencia de tercio de octava y de 125 Hz a 2000 Hz para bandas de octava. El resultado es un número entero y se expresa en dB. El procedimiento para la evaluación de magnitudes globales es el mismo para todas ellas.

El índice global ponderado de aislamiento acústico es el valor en dB, a 500 Hz de la curva de referencia una vez ajustada a los valores experimentales según el método especificado en la Norma UNE-EN ISO 717- 1. Existen magnitudes globales de las propiedades globales de aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción, como por ejemplo el índice ponderado de reducción sonora R_w y magnitudes globales del aislamiento al ruido aéreo entre recintos tales como: índice ponderado de reducción sonora aparente R'_w ; Diferencia de nivel estandarizada ponderada $D_{nT,w}$; Diferencia de nivel normalizada ponderada $D_{n,w}$, etc.

El índice global del aislamiento acústico de un elemento de construcción o entre recintos depende del espectro acústico de la fuente de ruido emisora. En consecuencia se añade al índice global ponderado un término de adaptación al espectro.

Término de adaptación al espectro: Es el valor, en dB, que ha de añadirse al valor de la magnitud global para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular.

Por ejemplo, es habitual utilizar para caracterizar el comportamiento acústico de un elemento constructivo en laboratorio el índice global R_w (C; C_{tr}), donde
- R_w es el índice ponderado de reducción sonora, en dB.
- C, término de corrección para ruido rosa ponderado A. Se utiliza en el caso de fuentes de ruido con pocas bajas frecuencias, por ejemplo: actividades humanas (conversación, música, radio, televisión, juegos de niños), trenes a velocidades medias y altas, autopistas a velocidades mayores de 80 km/h, aviones a reacción a distancias cortas, factorías que emiten ruido de frecuencias medias y altas.
- C_{tr}, término de corrección para ruido de tráfico urbano ponderado A, se utiliza en el caso de fuentes de ruido con predominio de bajas frecuencias, por ejemplo: tráfico urbano, trenes a velocidades bajas, aviones a propulsión, aviones a reacción a grandes distancias, música de discotecas, factorías que emiten ruido en frecuencias bajas y medias.

Cuanto más elevados sean R_w, $R_w + C$, $R_w + C_{tr}$, mayor será el aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento constructivo. Por ejemplo: R_W (C, C_{tr}) = 48 (-4, -8) dB, significa que el índice ponderado de reducción sonora R_w es 48 dB, que con ruido rosa ponderado A se reduce en 4 dB, y con tráfico se reduce en 8 dB.

Nota: Cuando se utiliza la Norma UNE-EN ISO 717-1 el rango de frecuencias utilizado en tercios de octava es entre 100 a 3150 Hz. Se puede utilizar un rango de frecuencias ampliado, que tiene que indicarse en los índices C y C_{tr}, el rango ampliado varía entre las bandas de frecuencia centrales de 50 Hz y 5 kHz. Por ejemplo en el DB HR Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación en España, el rango de frecuencias varía de 100 a 5000 Hz. En este caso:

$$R_A = R_w + C_{100\text{-}5000}; \qquad D_{2m,nT,Atr} = D_{2m,nT,w} + C_{tr,100\text{-}5000}$$

3) **Índice de Clase de Transmisión Sonora (STC).** La sociedad estadounidense para ensayo de materiales (ASTME) ha especificado un procedimiento conocido por Clase de Transmisión Sonora (STC). Se obtiene a partir de la comparación de la curva de las perdidas de transmisión con una curva de referencia. Las medidas se realizan en las 16 bandas de tercio de octava centradas entre 125 y 4000 Hz. Para el ajuste se deben de cumplir unos requisitos sobre las máximas desviaciones respecto a la curva de referencia. Este procedimiento es el habitual en Estados Unidos. Cuando las mediciones acústicas se realizan en edificios el índice se denomina Clase de Transmisión Sonora de Campo, (FSTC).

4.3.1.- ÍNDICES GLOBALES PONDERADOS A, SEGÚN EL DB HR PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO DEL CTE

Según la terminología de este documento se definen:

- **Índice global de reducción acústica ponderado A, de un elemento constructivo, R_A**: Valoración global, en dBA, del índice de reducción acústica R, para un ruido incidente rosa normalizado, ponderado A. A partir de los valores del índice de reducción acústica R, obtenidos mediante ensayo en laboratorio, este índice se define:

$$R_A = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - R_i)/10} \quad [dBA] \qquad (4.24)$$

R_i es el valor del índice de reducción acústica en la banda de frecuencia i, en dB; $L_{Ar,i}$ valor del espectro del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

- **Índice global de reducción acústica aparente, ponderado A, de un elemento constructivo, R'_A**: Valoración global, en dBA, del índice de reducción acústica aparente R´, para un ruido incidente rosa normalizado, ponderado A. Se define mediante la expresión siguiente

$$R'_A = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - R'_i)/10} \quad [dBA] \qquad (4.25)$$

R'_i es el valor del índice de reducción acústica en la banda de frecuencia i, en dB; $L_{Ar,i}$ valor del espectro del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

- **Índice global de reducción acústica ponderado A, para ruido exterior dominante de automóviles, R_{Atr}**: Valoración global, en dBA, del índice de reducción acústica R, para un ruido exterior de automóviles. Se define:

$$R_{Atr} = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i} - R_i)/10} \quad [dBA] \qquad (4.26)$$

R_i es el valor del índice de reducción acústica en la banda de frecuencia i, en dB; $L_{Atr,i}$ valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

- **Aislamiento acústico a ruido aéreo**: Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en dBA, entre el recinto emisor y el receptor.
- Para recintos interiores se utiliza el índice $D_{nT,A}$.

- Para recintos en los que alguno de sus cerramientos constituye una *fachada* o una *cubierta* en las que el *ruido exterior dominante* es el de automóviles o el de aeronaves, se utiliza el índice $D_{2m,nT,Atr}$.

- Para recintos en los que alguno de sus cerramientos constituye una *fachada* o una *cubierta* en las que el *ruido exterior dominante* es el de tráfico ferroviario o el de estaciones ferroviarias, se utiliza el índice $D_{2m,nT,A}$.

- Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, de una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para un ruido exterior de automóviles.
Se define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT,Atr} = -10.\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad (4.27)$$

$D_{2m,nT,i}$ la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB];
$L_{Atr,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz. En caso de ruido predominante de aeronaves también se utilizará este índice para la valoración global, pero usando los valores del espectro normalizado de ruido de aeronaves, ponderado A.

- Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, de una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para ruido rosa.
Se define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT,A} = -10.\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad (4.28)$$

$D_{2m,nT,i}$ la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB];
$L_{Ar,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz.
En caso de que el ruido exterior dominante sea el ferroviario o el de estaciones ferroviarias también se utilizará este índice para la valoración global, pero usando los valores del espectro normalizado de ruido ferroviario o de estaciones ferroviarias, ponderado A.

- Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores, $D_{nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, D_{nT}, para ruido rosa.
Se define mediante la expresión:

$$D_{nT,A} = -10.\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad (4.29)$$

$D_{nT,i}$ es la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB]; $L_{Ar,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz.

- Espectros normalizados de ruido, ponderado A.

Es la representación en forma numérica, de los valores de la presión sonora, ponderados A, correspondientes a ruidos rosa, de automóviles, de aeronaves y de ruido ferroviario o de estaciones ferroviarias en las frecuencias en bandas de tercios de octava. Los espectros normalizados se muestran en la Tabla 4.2.

Frecuencia central f_i, Hz	Espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, $L_{Ar,i}$, dBA	Espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, $L_{Atr,i}$, dBA	Espectro normalizado del ruido de aeronaves, ponderado A, $L_{Aav,i}$, dBA	Espectro normalizado del ruido ferroviario o de estaciones ferroviarias, ponderado A $L_{Aef,i}$ dBA
100	-30,1	-20	-23,8	-27,9
125	-27,1	-20	-20,2	-26,8
160	-24,4	-18	-15,4	-20,4
200	-21,9	-16	-13,1	-22,3
250	-19,6	-15	-12,6	-17,9
315	-17,6	-14	-10,4	-15,8
400	-15,8	-13	-9,8	-11
500	-14,2	-12	-9,5	-13,2
630	-12,9	-11	-8,7	-11,7
800	-11,8	-9	-9,5	-9,3
1.000	-11	-8	-10,5	-8,7
1.250	-10,4	-9	-11,0	-7,3
1.600	-10	-10	-12,5	-8,6
2.000	-9,8	-11	-14,9	-10,7
2.500	-9,7	-13	-15,9	-13,9
3.150	-9,8	-15	-18,6	-16,7
4.000	-10	-16	-23,3	-17,9
5.000	-10,5	-18	-29,9	-21,1

Tabla 4.2: Espectros normalizados de ruido.

4.3.2 – PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS MAGNITUDES GLOBALES DE LAS PROPIEDADES DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EN EDIFICIOS, SEGÚN LA NORMA UNE-EN ISO 717-1. EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. PARTE 1: AISLAMIENTO AL RUIDO AÉREO.

Es el método más difundido, se basa en la comparación de una curva de aislamiento obtenida con curva tipo, siguiendo un determinado procedimiento. Mediante este se consigue que la dependencia de la frecuencia del aislamiento a ruido aéreo se transforme en un único número. Los métodos de medición del aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción y en edificios han sido normalizados en las Normas Internacionales ISO 140 partes 3, 4, 5, 9 y 10. La ISO 717-1 tiene por objetivo normalizar un método por el cual la dependencia en función de la frecuencia del aislamiento a ruido aéreo pueda convertirse en un solo número que caracterice el

aislamiento acústico y simplificar la formulación de los requisitos acústicos en los códigos de la edificación.

Para la aplicación de la ISO 717-1, se utilizan los términos definidos anteriormente tales como: Magnitud global para la valoración del aislamiento al ruido aéreo y Término de adaptación al espectro.

Procedimiento para la evaluación de las magnitudes globales

Es el mismo para todas ellas. Para valorar los resultados conforme a las Normas ISO 140 en bandas de un tercio de octava o de octava, con precisión de 0,1 dB, se desplaza la curva de referencia, Tabla 4.3, en saltos de 1 dB hacia la curva medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor de 32,0 dB, para mediciones en 16 bandas de tercio de octava, o 10,0 dB, para mediciones en 5 bandas de octava.

Se produce una desviación desfavorable en una determinada banda de frecuencia cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de la curva de referencia desplazada. Únicamente se consideran las desviaciones desfavorables.

El valor, en dB, de la curva de referencia en la banda de 500 Hz, después del desplazamiento, de acuerdo con el procedimiento anterior es el índice global ponderado (R_w, $D_{nT,w}$, etc.).

El rango de frecuencias de la curva de referencia y de la de medición está entre 100 y 3150 Hz en bandas de tercio de octava y de 125 a 2000 Hz para bandas de octava. El rango de frecuencias puede ampliarse entre 50 y 5000 Hz.

Frecuencia, Hz	Valores de referencia, dB	
	Bandas de tercio de octava	Bandas de octava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

Tabla 4.3: Valores de referencia para aislamientos a ruido aéreo:

En la figura 4.3 se representan los valores de la curva de referencia usados para comparar con los resultados de la medición, para aislamiento al ruido aéreo, en bandas de tercio de octava.

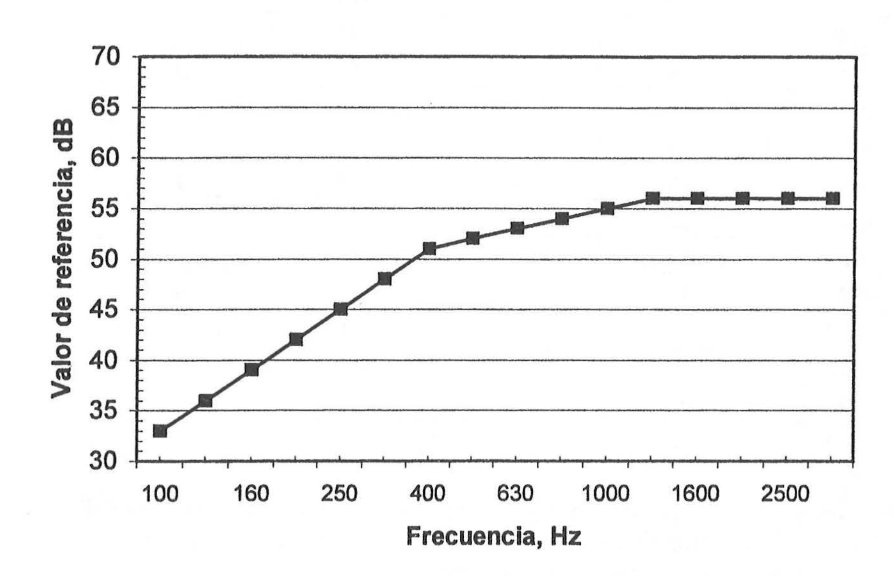


Figura 4.3: Valores de la curva de referencia en tercios de octava.

- Cálculo de los términos de adaptación espectral

Los términos de adaptación espectral, C_j, deben calcularse con los espectros sonoros dados en las Tablas 4 o 5 según el rango de frecuencias utilizado, mediante la ecuación:

$$C_j = X_{Aj} - X_w \text{ dB} \qquad (4.30)$$

donde

j, es el índice de los espectros sonoros C, C_{tr}

X_w , es el valor del índice global calculado a partir de R, R', D_n, D_{nT}

X_{Aj} se calcula a partir de la expresión

$$X_{Aji} = -10 \log \sum 10^{0,1(L_{ij} - X_i)} \quad dB \qquad (4.31)$$

donde

i es el índice para las bandas de tercio de octava, o para las bandas de octava.

L_{ij} son los niveles a la frecuencia i para el espectro j

X_i es R_i , o R'_i , o $D_{n,i}$, o $D_{nT,i}$, a la frecuencia de medida i dada expresado con una cifra decimal. Según la Norma UNE-EN ISO 717:1997/A1:2007 el redondeo se realiza de la siguiente forma: la cantidad XX,YZZ.., se redondea a XX si Y< 0,5, a XX+1 si Y ≥ 0,5.

Se calcula el término de adaptación espectral con precisión de 0,1 dB y se redondea al número entero más próximo. Por ejemplo para R_w los términos de adaptación se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$C = -10.\log\left(\sum_{i=1}^{N} 10^{0,1(L_{i,1} - R_i)}\right) - R_w \text{ dB} \quad ; \quad C_{tr} = -10.\log\left(\sum_{i=1}^{N} 10^{0,1(L_{i,2} - R_i)}\right) - R_w \text{ dB}$$

Frecuencia, Hz	Niveles sonoros L_{ij}, dB			
	Espectro para calcular C		Espectro para calcular C_{tr}	
	Tercio de octava	Octava	Tercio de octava	Octava
100	-29		-20	
125	-26	-21	-20	-14
160	-23		-18	
200	-21		-16	
250	-19	-14	-15	-10
315	-17		-14	
400	-15		-13	
500	-13	-8	-12	-7
630	-12		-11	
800	-11		-9	
1000	-10	-5	-8	-4
1250	-9		-9	
1600	-9		-10	
2000	-9	-4	-11	-6
2500	-9		-13	
3150	-9		-15	

Nota: Todos los niveles están ponderados A y el nivel global de espectro normalizado a 0 dB.

Tabla 4.4: Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación del espectro de 100 a 3150 Hz.

Para las mediciones in situ de acuerdo con las Normas ISO 140-4 o 5, se debe indicar si los resultados globales se expresan en octavas o tercios de octava. Es habitual encontrar diferencias de ± 1 dB.

Frecuencia, Hz	Niveles sonoros L_{ij}, dB			
	Espectro para calcular $C_{100\text{-}5000}$		Espectro para calcular $C_{tr,100\text{-}5000}$	
	Tercio de octava	Octava	Tercio de octava	Octava
100	-30		-20	
125	-27	-22	-20	-14
160	-24		-18	
200	-22		-16	
250	-20	-15	-15	-10
315	-18		-14	
400	-16		-13	
500	-14	-9	-12	-7
630	-13		-11	
800	-12		-9	
1000	-11	-6	-8	-4
1250	-10		-9	
1600	-10		-10	
2000	-10	-5	-11	-6
2500	-10		-13	
3150	-10		-15	
4000	-10	-5	-16	-11
5000	-10		-18	

Nota: Todos los niveles están ponderados A y el nivel global del espectro está normalizado a 0 dB.

Tabla 4.5: Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación del espectro.

4.4 EJEMPLOS DE CÁLCULO DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO

En este apartado se realizan varios ejemplos de cálculo de diferentes magnitudes acústicas de acuerdo con la Normas UNE-EN ISO correspondientes y el DB HR Protección frente al ruido del CTE.

EJERCICIO 1

El índice de reducción acústica R de un vidrio monolítico de espesor 6 mm es el siguiente. (UNE-EN-ISO 140-3).

Frecuencia central, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
R, dB	18	23	30	35	27	32

Calcúlese el índice ponderado de reducción acústica $R_w(C;C_{tr})$ de acuerdo con la UNE-EN ISO 717-1.

SOLUCIÓN

Índice ponderado de reducción sonora R_w

Se desplaza la curva de referencia en saltos de 1 dB hacia la curva medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea la mayor posible, pero no mayor de 10 dB. Una desviación es desfavorable en una banda cuando (Valor curva de ref + Desplazamiento – R_i) > 0.

(d) Desplazamiento de la curva de referencia: -21dB								
Frec., Hz	**(a)** C.R, dB	**(b)** R, dB	**a+d-b** dB	Desv. Desf. dB	Espectro 1 para C L_{i1}, dB	$L_{i1}-$ **b_i** dB	Espectro 2 paraC_{tr} L_{i2}, dB	$L_{i2}-$ **b_i** dB
125	36	18	-3,0	-	-21	-39,0	-14	-32,0
250	45	23	1,0	1,0	-14	-37,0	-10	-33,0
500	52	30	1,0	1,0	-8	-38,0	-7	-37,0
1000	55	35	-1,0	-	-5	-40,0	-4	-39,0
2000	56	27	8,0	8,0	-4	-31,0	-6	-33,0
	S. D.D = 10≤ 10 dB R_w = 52-21 = 31 dB				$X_{A1} = -10.\lg(\sum 10^{0,1(L_{ij}-b_i)}$ dB X_A = 28,6 C = 29– 31= -2 dB		$X_{A2} = -10.\lg(\sum 10^{0,1(L_{i2}-b_i)}$ dB X_{A2} = 27,4 C_{tr} = 27 – 31 = -4 dB	
$R_w(C;C_{tr})$ = 31(-2;-4) dB								

EJERCICIO 2

El índice de reducción acústica R de una pared doble de citara de ladrillo cerámico perforado, cámara de 5 cm y tabique de ladrillo hueco sencillo, con revestimientos exteriores con mortero de yeso por una cara y mortero de cemento por otra, (m′ = 265 kg/m^2) es el que se muestra en la tabla siguiente.

Frecuencia, Hz	R, dB
100	47
125	39,5
160	46,5
200	47
250	44
315	44,5
400	45
500	45
630	47

800	47,5
1000	52
1250	54,5
1600	57,5
2000	65
2500	66
3150	73
4000	75
5000	76

Calcúlense: a) El índice de reducción acústica ponderado $R_w(C_{100\text{-}5000};C_{tr100\text{-}5000})$ según la UNE-EN ISO 717-1; b) los índices globales de reducción acústica ponderados A, de un elemento constructivo R_A y para ruido exterior de automóviles R_{Atr} según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE.

SOLUCIÓN

(d) Desplazamiento de la curva de referencia:-1 dB								
Frec. , Hz	**(a)** C.R, dB	**(b)** R, dB	**a+d- b** dB	Desv. Desf. dB	Espectro 1para C L_{i1}, dB	L_{i1}– **b** dB	Espectro 2 para C_{tr} L_{i2}, dB	L_{i2}– **b** dB
100	33	47	-15	0,0	-30	-77	-20	-67
125	36	39,5	-4,5	0,0	-27	-66,5	-20	-59,5
160	39	46,5	-8,5	0,0	-24	-70,5	-18	-64,5
200	42	47	-6,0	0,0	-22	-69	-16	-63
250	45	44	0,0	0,0	-20	-64	-15	-59
315	48	44,5	2,5	2,5	-18	-62,5	-14	-58,5
400	51	45	5,0	5,0	-16	-61	-13	-58
500	52	45	6,0	6,0	-14	-59	-12	-57
630	53	47	5,0	5,0	-13	-60	-11	-58
800	54	47,5	5,5	5,5	-12	-59,5	-9	-56,5
1000	55	52	2,0	2,0	-11	-63	-8	-60
1250	56	54,5	0,5	0,5	-10	-64,5	-9	-63,5
1600	56	57,5	-2,5	0,0	-10	-67,5	-10	-67,5
2000	56	65	-10	0,0	-10	-75	-11	-76
2500	56	66	-11	0,0	-10	-76	-13	-79
3150	56	73	-18	0,0	-10	-83	-15	-88
4000	-	75	0,0	0,0	-10	-85	-16	-91
5000	-	76	0,0	0,0	-10	-86	-18	-94
		S. D.D = 26,5 < 32 dB R_w = 52-1 = 51 dB			$X_{A1} = -10.\lg(\sum 10^{0,1(L_{ij}-b_i)}$ dB X_A = 51,7 dB= 52 dB $C_{100\text{-}5000}$ = 52 –51 $C_{100\text{-}5000}$ = 1 dB		$X_{A2} = -10.\lg(\sum 10^{0,1(L_{i2}-b}$ X_{A2} = 48,6 $C_{tr(100\text{-}5000)}$ = 49 –51 $C_{tr(100\text{-}5000)}$ = -2 dB	
$R_{,w}(C_{100\text{-}5000;}Ctr_{100,5000})$ = 51(1; -2) dB								

b1) Índice global de reducción acústica ponderado A del elemento constructivo R_A según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE.

$$R_A = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i}-R_i)/10} \quad [dBA]$$

Frecuencia central f_i, Hz	R_i, dB	Espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A, $L_{Ar,i}$, dBA	$L_{Ar,I}$ - R_i
100	47	-30,1	-77,1
125	39,5	-27,1	-66,6
160	46,5	-24,4	-70,9
200	47	-21,9	-68,9
250	44	-19,6	-63,6
315	44,5	-17,6	-62,1
400	45	-15,8	-60,8
500	45	-14,2	-59,2
630	47	-12,9	-59,9
800	47,5	-11,8	-59,3
1.000	52	-11	-63
1.250	54,5	-10,4	-64,9
1.600	57,5	-10	-67,5
2.000	65	-9,8	-74,8
2.500	66	-9,7	-75,7
3.150	73	-9,8	-82,8
4.000	75	-10	-85
5.000	76	-10,5	-86,5
$R_A = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i}-R_i)/10} \quad [dBA]$ **R_A = 51,7 dBA**			

b2) Índice global de reducción acústica ponderado A, para ruido exterior dominante de automóviles R_{Atr} según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE.

$$R_{Atr} = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i}-R_i)/10} \quad [dBA]$$

Frecuencia central f_i, Hz	R_i dB	Espectro normalizado de ruido de automóviles, ponderado A, $L_{Ar,i}$, dBA	$L_{Atr,I}$ - R_i
100	47	-20	-67
125	39,5	-20	-59,5
160	46,5	-18	-64,5
200	47	-16	-63
250	44	-15	-59
315	44,5	-14	-58,5
400	45	-13	-58
500	45	-12	-57
630	47	-11	-58
800	47,5	-9	-56,5
1.000	52	-8	-60
1.250	54,5	-9	-63,5
1.600	57,5	-10	-67,5
2.000	65	-11	-76
2.500	66	-13	-79
3.150	73	-15	-88
4.000	75	-16	-91
5.000	76	-18	-94
$R_{Atr} = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i}-R_i)/10} \quad [dBA]$ **R_{Atr} = 48,6 dBA**			

EJERCICIO 3

En un recinto de volumen 52,7 m^3 , de área de la fachada 8,6 m^2 y de área de hueco 4 m^2 se han realizado mediciones acústicas s del aislamiento acústico a ruido aéreo de la fachada, según la Norma UNE-EN ISO 140-5. Los resultados promedios de las magnitudes acústicas medidas son los siguientes

Frecuencia, Hz	$L_{1,2m}$, dB	L_2, dB	T_2, s
100	77,6	55,9	1,05
125	79,5	61,4	1,14
160	80,1	61	1,29
200	82,5	59,5	1,38
250	81	61	1,38
315	78,9	55,5	1,34
400	79,5	52,2	1,26
500	80,5	53,9	1,39
630	84,3	56,5	1,2
800	81,6	55,3	1,22
1000	74,7	49,4	1,31
1250	80,5	51	1,09
1600	82,4	53,6	1,23
2000	83,7	53,7	1,06
2500	80,7	48,5	0,96
3150	73,5	39,4	0,96
4000	70,6	36	0,87
5000	64,6	31,8	0,77

No se han incluido los valores del ruido de fondo en el recinto receptor al ser mucho menores que los valores del nivel sonoro en el recinto receptor L_2.

Calcúlense: a) la diferencia de niveles estandarizada ponderada $D_{2m,nT,w}+C_{tr(100\text{-}5000)}$ de la fachada del recinto según la UNE-EN ISO 717-1; b) la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, frente al ruido de tráfico de la fachada $D_{2m,nT,\ Atr}$ según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE. c) Estímese el nivel sonoro de inmisión en dBA si el nivel de presión sonora promedio del ruido de tráfico a dos metros de la fachada es 67 dBA.

SOLUCIÓN

a) - $D_{2m,nT,w}(C_{100\text{-}5000};Ctr_{100,5000})$ = 32(0; -2) dB
b) - $D_{2m,nT,Atr}$ = 29,9 dBA
c) - $L_{2,nTAtr}$ = 37,1 dBA

BIBLIOGRAFÍA

- Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido;
- RD 1513/2005, de 16 de diciembre
- RD 1367/2007, de 19 de octubre.
- RD 1371/2007, de 19 de octubre por el que se aprueba el DB HR Protección frente al ruido del CTE.
- UNE-ISO 1996-1 (junio 2005). Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. . Parte 1: magnitudes básicas y métodos de evaluación. (ISO 1996-1:2003).
- ISO 1996-2 (marzo 2007). Acoustics- Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels.
- ISO 9613-1., Acoustics- Attenuation of sound during propagation outdoors- Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- ISO 9613-2., Acoustics- Attenuation of sound during propagation outdoors- Part 2: General method of calculation
- UNE EN ISO 354, Febrero 2004. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354: 2003)
- UNE EN ISO 3382:2001. Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos (ISO 3382: 1997).
- UNE-EN ISO 140-3:-Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción.
- UNE-EN ISO 140-4:- Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición *in situ* del aislamiento a ruido aéreo entre locales.
- UNE-EN ISO 140-5: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte5: Mediciónes in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas

- UNE-EN ISO 140-10: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 10: Medición en laboratorio del aislamiento a ruido aéreo de los elementos de construcción pequeños.
- UNE-EN ISO 140-14: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 14. Directrices para situaciones especiales in situ. (ISO 140-14: 2004).
- UNE-EN ISO 140-16: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 16. Medición en laboratorio de la mejora del índice de reducción acústica por un revestimiento (ISO 140-16: 2006).
- UNE-EN ISO 717-1: 1996. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.
- UNE-EN ISO 717-1: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Modificación 1: Normas de redondeo asociadas con los índices expresados por un único número y con las magnitudes expresadas por un único número. (ISO 717-1:1996/AM 1:2006)
- EN ISO 140-6- Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 6: Mediciones en laboratorio del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos.
- EN ISO 140-7- Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte7: Medición in situ del aislamiento acústico de suelos a ruido de impactos.
- EN ISO 140-8 - Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 8: Medición en laboratorio de la reducción del ruido de impactos transmitido a través de revestimiento de suelos sobre forjado normalizado pesado.
- EN ISO 140-11 - Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte11: Medición en laboratorio de la reducción del ruido de impactos transmitido a través de revestimientos de suelos sobre suelos de referencia (ISO 140-11: 2005)
- EN ISO 140-12 - Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte12: Medición en laboratorio de aislamiento al ruido aéreo y de impactos entre locales con suelo registrable. (ISO 140-12:2000).
- UNE-EN ISO 717-2:1996. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos.

- UNE-EN ISO 717-2: Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos. Modificación 1 (ISO 717-2:1996/AM 1:2006).

5 AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE UNA HOJA

5.1 INTRODUCCIÓN

Unos objetivos importantes en el estudio del aislamiento acústico son proyectar y construir sistemas constructivos que tengan un elevado índice de reducción acústica. En general el problema a resolver consiste en, conocida una fuente de ruido, sus caminos de propagación y los parámetros geométricos y acústicos de la sala receptora, calcular los sistemas constructivos que aseguren, con un adecuado margen de seguridad, que los niveles sonoros de inmisión en la sala no superen los niveles máximos establecidos en la legislación.

En este tema se presentarán los resultados básicos de diferentes modelos matemáticos para predecir el índice de reducción acústica de sistemas constructivos de una hoja y se mostrará su comportamiento en ensayos realizados en laboratorio, donde se considera que la transmisión entre las cámaras de ensayo es directa a través de la muestra objeto de ensayo. En temas posteriores se estudiarán sistemas constructivos de varias hojas y construcciones especiales, para finalmente estudiar modelos de transmisión acústica entre recintos.

5.2.- EL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO TEÓRICO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SIMPLES DE UNA HOJA.

Una partición simple se define como aquella que tiene sus dos caras exteriores rígidamente unidas, de forma que se mueven como si fueran una. Son particiones delgadas y homogéneas, por ejemplo yeso laminado, tableros de fibra de madera, vidrios, paredes de hormigón, ladrillos, etc. Los parámetros físicos que tienen mayor influencia en el índice de reducción acústica a ruido aéreo R, de un elemento constructivo de una partición simple son: la masa, la rigidez de la partición, las resonancias, los efectos de coincidencia, la frecuencia de las ondas acústicas y su ángulo de incidencia con la partición. En acústica de la edificación las frecuencias de interés están aproximadamente entre las bandas de frecuencia central de 100 Hz y 5000 Hz.

Para calcular el índice de reducción acústica de elementos simples de una hoja hay que tener en cuenta el modelo de vibración del sistema, compuesto por vibraciones forzadas, producidos por el campo sonoro externo (campo no resonante) y por vibraciones debidas a las vibraciones naturales producidas por las reflexiones desde el contorno de la pared (campo resonante).

Existen diferentes expresiones teóricas para calcular el índice de reducción acústica según la frecuencia del sonido incidente sobre el elemento constructivo de una hoja de grandes dimensiones [1], [2], [3], [4]. Estos modelos tienen en consideración los diferentes fenómenos físicos que se producen en la transmisión del sonido a través de un sistema constructivo. Basado en la referencia [3], el anexo B de la Norma UNE EN 12354-1:2000, [5], muestra un modelo matemático muy completo y prolijo para el cálculo del índice de reducción acústica de elementos monolíticos. Por ejemplo Sewell [6] propone la siguiente fórmula de cálculo para el coeficiente de transmisión sonora τ,

según que la frecuencia incidente sea menor, igual o mayor que la frecuencia crítica del panel. A partir del valor de τ se calcula el índice de reducción acústica R.

$$\tau = \left(\frac{Z_0}{\pi f m'}\right)^2 \left[2\sigma_f + \frac{(a+b)^2}{a^2+b^2}\sqrt{\frac{f_c}{f}}\cdot\frac{\sigma^2}{\eta_{tot}}\right] \qquad f < f_c$$

$$\tau = \left(\frac{Z_0}{\pi f m'}\right)^2 \left[\frac{\pi \sigma^2}{2\eta_{tot}}\right] \qquad f = f_c \qquad (5.1)$$

$$\tau = \left(\frac{Z_0}{\pi f m'}\right)^2 \left[\frac{\pi f_c \sigma^2}{2 f \eta_{tot}}\right] \qquad f > f_c$$

Donde a y b son las dimensiones del panel, m′ la masa por unidad de superficie del panel, η_{tot} es el factor de pérdidas total, σ y σ_f son los factores de radiación para transmisiones resonantes y no resonantes, $Z_0 = \rho c$.

En muchas situaciones prácticas las propiedades características de los sistemas constructivos no son conocidas adecuadamente, siendo el factor de pérdidas el parámetro más crítico, y en el intervalo de frecuencias alrededor de la frecuencia crítica existe mayor incertidumbre en los valores obtenidos del índice de reducción acústica.

Para estimaciones aproximadas, suelen realizarse algunas simplificaciones, algunas de las cuales se expondrán a continuación.

En las particiones simples de una hoja delgada pueden distinguirse en general cuatro zonas del dominio de frecuencias comprendidas entre la frecuencia natural de la partición en el vacío f_0 y la frecuencia crítica f_c. En la figura 5.1 se muestran de forma aproximada y resaltando las diferentes zonas, la variación del índice de reducción acústica al ruido aéreo en función de la frecuencia.

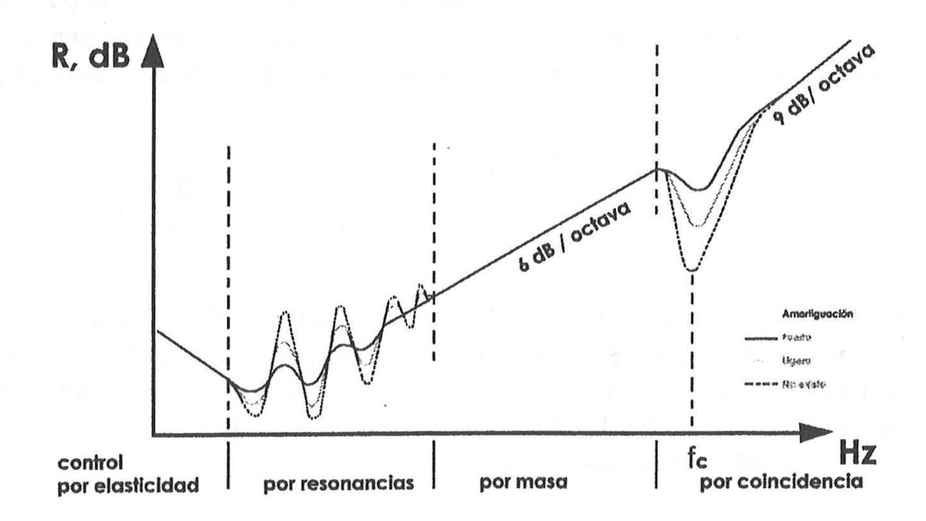


Figura 5.1: Índice de reducción acústica de una partición simple de una hoja.

1) *Zona controlada por la rigidez.*

A muy bajas frecuencias el aislamiento al ruido aéreo está controlado básicamente por la rigidez de la partición. Se cumple que cuanto mayor es la rigidez, menor es el aislamiento al ruido aéreo.

La frecuencia natural de una partición simple homogénea ilimitada se calcula mediante la expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{m'}}\ Hz \qquad (5.2)$$

donde: s es la rigidez de la pared por unidad de superficie y m′ es la masa de la partición por unidad de superficie, kg/m^2. En esta zona el índice de reducción acústica a ruido aéreo se obtiene mediante la expresión:

$$f < f0 \qquad R = 20.\lg(s) - 20\lg(f) - 74{,}2\ dB \qquad (5.3)$$

El aislamiento acústico a ruido aéreo está determinado principalmente por la rigidez del montaje y decrece 6 dB/octava con el aumento de la frecuencia. Este efecto generalmente no se observa en las mediciones acústicas en la edificación, en parte debido a que el fenómeno se presenta fuera del rango de frecuencias en las que se realizan las mediciones. Si la hoja es muy ligera, por ejemplo una lámina delgada de plástico, la expresión anterior no es válida.

2) Zona controlada por las resonancias del sistema

La partición tiene numerosos modos propios de vibración correspondientes a las frecuencias de resonancia de flexión. Estas dependen de las dimensiones de la partición, de la rigidez y de la masa por unidad de superficie de la partición. Las frecuencias de resonancia de flexión en una partición simple finita se pueden calcular mediante la expresión:

$$f_{p,q} = K.h.\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}\left[\left(\frac{p}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_y}\right)^2\right] = K.h.c_L\left[\left(\frac{p}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_y}\right)^2\right]\ Hz \qquad (5.4)$$

donde: ρ es la densidad de los materiales de la partición; h el espesor de la partición; p,q = 1,2,3,...; L_x, L_y son las dimensiones de la partición; ν es el coeficiente de Poisson, en la mayoría de los casos prácticos su valor es 1/3, K es un coeficiente numérico que depende del modo de fijación de los bordes de la partición. Su valor es: K = 0,45 para bordes soportados; K = 0,86 para bordes encastrados.

Predomina la frecuencia de resonancia f_{11}, y los valores grandes de L_x y L_y reducen su valor. La menor frecuencia de resonancia marca la transición entre la zona controlada por la rigidez y la zona controlada por la masa de la partición. En paredes habituales en la edificación de área mayor de 10 m^2, la frecuencia de resonancia f_{11} se produce a muy bajas frecuencias. Por ejemplo en el caso de una hoja de vidrio con bordes encastrados, de dimensiones 1x 1,5 m y 5 mm de espesor, f_{11} = 28 Hz.

3) <u>*Zona controlada por la masa*</u>

A partir de valores de la frecuencia superiores al doble de la frecuencia de resonancia f_{11} y hasta la mitad de la frecuencia crítica, $f_c/2$, el aislamiento al ruido aéreo está controlado por la masa y la frecuencia, de acuerdo con las siguientes expresiones:

3.1) *Ley de masa a incidencia normal*

Se puede demostrar en teoría, ver ejemplo posterior, que la ley de masa a incidencia normal de particiones ilimitadas es

$$R_{\theta=0} = 10\lg\left[1+\left(\frac{\pi f m'}{\rho c}\right)^2\right] \quad dB \tag{5.5}$$

En general en los sistemas constructivos $(\pi f m')^2 \rangle\rangle (\rho c)^2$ y se puede escribir

$$R(\theta = 0) \approx 20.\lg(m' f) - 42{,}4 \quad dB \tag{5.6}$$

El índice de reducción acústica aumenta 6 dB cada vez que se duplica la masa o la frecuencia. Para aislar un ruido es necesario utilizar materiales de alta densidad superficial m′ y los sonidos de altas frecuencias se aíslan mejor que los de bajas frecuencias.

La expresión anterior se obtiene en teoría en condiciones ideales. Sobre la partición inciden perpendicularmente ondas planas longitudinales. La partición se considera sin rigidez, y no se disipa energía en la partición ni en el fluido que la rodea.

3.2) *Ley de masa a incidencia aleatoria*

Si se tiene en consideración el ángulo de incidencia θ de las ondas sobre la partición, se obtiene la expresión

$$R_\theta = 10\lg\frac{1}{\tau_\theta} = 10\lg\left[1+\left(\frac{\pi f m' \cos\theta}{\rho c}\right)^2\right] dB \tag{5.7}$$

Si en un recinto se considera que el campo acústico incide de forma aleatoria sobre una partición, en este caso se puede considerar un coeficiente de transmisión promedio, considerando todos los ángulos de incidencia entre 0° y 90°, para esta situación se deduce

$$R_{aleatorio} \cong R(0) - 10\lg[0{,}23R(0)] \quad dB \tag{5.8}$$

3.3) *Ley de masa a incidencia de campo*

En la práctica es más aproximada a la realidad la expresión del índice de reducción acústica R, con ángulos de incidencia de 0° a 78°, incidencia de campo, que viene dado por la expresión:

$$R_{campo} = R(0) - 5 \approx 20\lg(m'f) - 47,4 \quad dB \qquad (5.9)$$

La expresión anterior es una ley semiempírica denominada *Ley de masa a incidencia de campo.*

m' es la masa por unidad de superficie del elemento constructivo en kg/m^2; f es la frecuencia del sonido incidente en Hz. Según la expresión anterior el índice de reducción acústica R, aumenta 6 dB cada vez que se duplica la masa o la frecuencia, ver la figura 5.2.

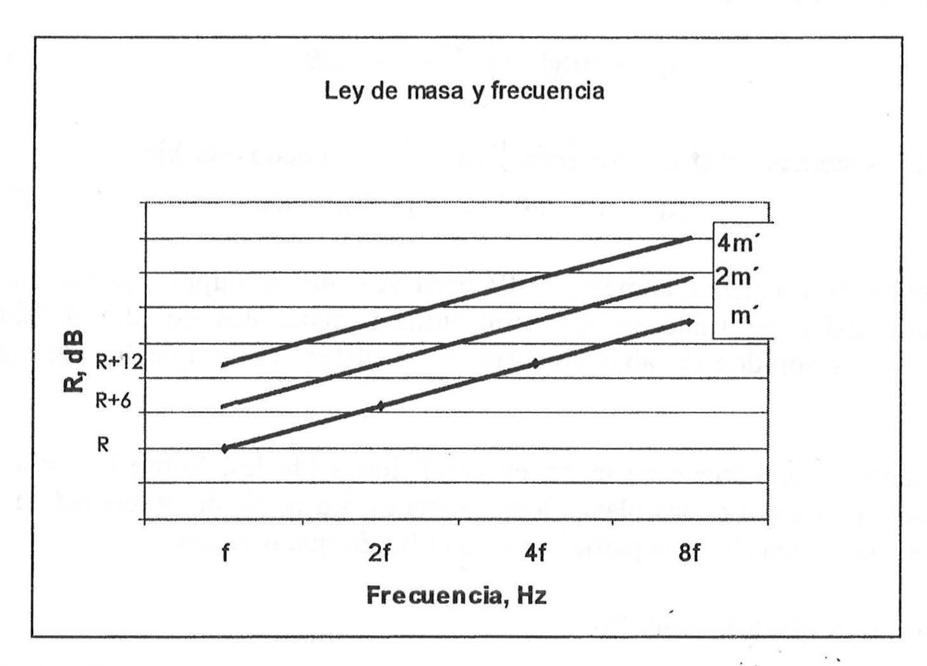


Figura 5.2: Ley de masas a incidencia de campo

4) <u>Zona controlada por la coincidencia</u>

Las expresiones anteriores del índice de reducción acústica R, no tienen en consideración las vibraciones de flexión de la partición. A partir de una determinada frecuencia llamada crítica, f_c, hay una disminución importante del índice de reducción acústica debido al fenómeno de coincidencia. Este fenómeno se manifiesta en un intervalo de frecuencias que va desde valores algo inferiores al de la frecuencia crítica hasta aproximadamente una octava por encima de esta.

En el aire, el sonido se propaga mediante ondas longitudinales y su velocidad es la misma para todas las frecuencias. Cuando en un sólido se produce una deformación forzada localizada, se originan ondas libres que se propagan por todo el sólido. Si la partición de una hoja es lo suficientemente delgada, se producen ondas de flexión, que al contrario que otros tipos de ondas, se propagan con una velocidad que es función de la frecuencia. Existirá una frecuencia llamada crítica, a partir de la cual habrá un ángulo de incidencia, en el que se cumpla que la traza de la longitud de onda del sonido en el aire, coincida con la longitud de la onda de flexión. Esta condición se conoce como efecto de coincidencia, (coincidence effect o trace-matching). *La frecuencia crítica de*

coincidencia se define como la menor frecuencia a la que se produce el efecto de coincidencia y corresponde a un ángulo de incidencia de 90°.

Los elementos de la partición son solicitados por dos ondas, la onda aérea incidente, (forzada), y la onda de flexión, (libre). La traza de la onda aérea avanza por la partición con una velocidad c/senθ y la onda de flexión con una velocidad c_f. Cuando las dos velocidades a lo largo de la partición son iguales, los efectos se acumulan y existe una gran radiación de energía por la partición. La disminución del índice de reducción acústica es importante en la zona de coincidencia. La disminución, será mayor o menor, en función del valor del factor de pérdidas total de la partición.

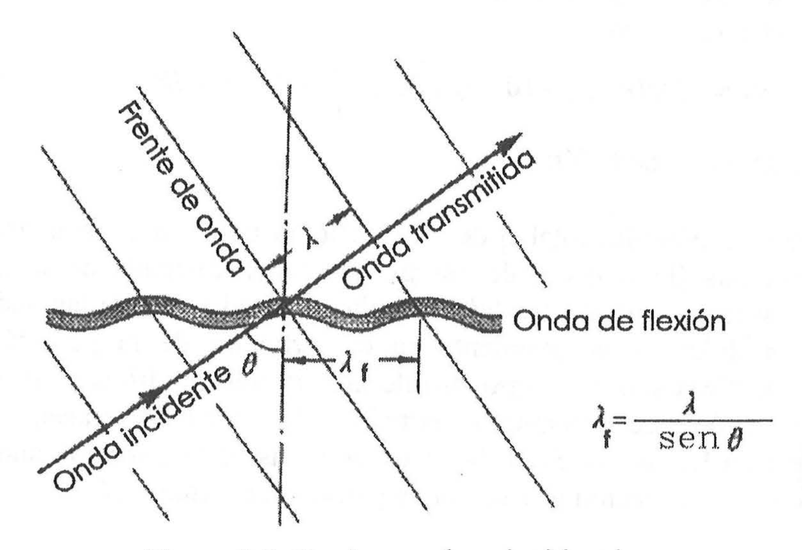


Figura 5.3: Fenómeno de coincidencia

La frecuencia de coincidencia para un ángulo de incidencia se obtiene de la expresión

$$f_{coincidencia,\theta} = \frac{c^2}{2\pi h sen^2\theta}\sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad Hz \qquad (5.10)$$

La frecuencia crítica de la partición se obtiene cuando el ángulo de incidencia es 90° y se obtiene de la fórmula

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B}} = \frac{c^2}{2\pi d}\sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} = \frac{c^2}{1{,}8c_L h} \quad Hz \qquad (5.11)$$

h, es el espesor de la partición en metros; m′ = ρh, la masa de la partición por unidad de superficie; B, la rigidez dinámica de la partición por unidad de anchura; ρ la densidad del material de la partición; E, el módulo de Young y ν, el coeficiente de Poisson, c_L, la velocidad de las ondas longitudinales en la partición y c la velocidad del sonido en el aire.

La frecuencia crítica y el espesor de una partición son magnitudes inversamente proporcionales. Ver la tabla 5.1.

El índice de reducción acústica en el la banda de frecuencia donde está la localizada la frecuencia de coincidencia se puede determinar de forma aproximada mediante la ecuación

$$f = f_c \qquad R = 20\lg(m'f) + 10\lg\eta + 10\lg(\frac{\Delta f}{f_c}) - 44 \quad dB \qquad (5.12)$$

donde Δf es el ancho de banda, en tercios de octava u octavas. En esta zona del rango de frecuencias es importante el factor de amortiguamiento del sistema constructivo.

5) *Zona de frecuencias superiores a la crítica.*

Para frecuencias superiores a la crítica, el índice de reducción acústica se puede calcular mediante la expresión (Cremer, 1942):

$$f > f_c \qquad R = 20\lg(m'f) + 10\lg\eta + 10\lg(\frac{f}{f_c} - 1) - 44\, dB \qquad (5.13)$$

η, es el factor de pérdidas de la partición.

En la práctica el factor de pérdidas total η de una partición tiene en consideración el factor de pérdidas internas (la fracción de energía mecánica disipada en forma de energía calorífica intrínsecamente), las pérdidas debidas a la radiación de las ondas de flexión libres y las pérdidas de acoplamiento en el perímetro de la partición. La colocación de juntas elásticas sobre el perímetro de la partición modifica el factor de pérdidas, al cambiar la unión mecánica entre la partición y las paredes laterales, y variar las perdidas de energía en las juntas. Si el factor de pérdidas de la partición aumenta, también mejora el índice de reducción acústica de la partición, apartado 2.6.

Paredes gruesas

Como la mayoría de los materiales tienen un coeficiente de Poisson que varía entre 0,2 y 0,3, la frecuencia límite en la que se puede aplicar la teoría de las ondas de flexión pura para placas delgadas es, λ_F = 6h, que se puede aproximar mediante la expresión (Cremer, 1973):

$$f_{F,\lim\ del} \approx \frac{0{,}05.c_{CL,p}}{h} = \frac{0{,}05}{h}\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} = \frac{c_{CL,p}}{20.h} \qquad (2.33)$$

En paredes de albañilería, hormigón, forjados es habitual que la frecuencia límite se halle en el rango de las medias o altas frecuencias. La ecuación de las ondas de flexión debe ser modificada incluyendo las deformaciones de cizalladura y la inercia del giro. Mindlin, [7] demostró que a altas frecuencias la velocidad de la onda de flexión es menor que la velocidad de la onda de cizalladura. La onda resultante es una combinación de las ondas de flexión y de cizalladura. Rindell, [8] ha propuesto la siguiente expresión para la velocidad de de fase para placas gruesas

$$c_{f,p,\ gruesa} = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{c_{f,p}^3} + \frac{1}{\gamma^3 c_{T,p}^3}\right)}} \qquad (5.14)$$

Donde: γ = 0,689 para el coeficiente de Poisson ν = 0,2
γ = 0,841 para el coeficiente de Poisson ν = 0,3
γ = 0,919 para el coeficiente de Poisson ν = 0,4

Debido a otros aspectos que limitan la precisión en la predicción del índice de reducción acústica de sistemas constructivos, en particular a altas frecuencias, donde muchos sistemas constructivos no pueden considerarse homogéneos, en general es suficiente el uso de la teoría de las placas planas en el rango de frecuencias de interés en la acústica de la edificación.

Cuando el espesor de la pared o el panel es mayor que la longitud de onda, predominan las ondas de cizalladura. Cuando la frecuencia de la onda de cizalladura es inferior a la de la frecuencia crítica, no hay efecto de coincidencia y los mecanismos de las ondas de cizalladura disminuyen el índice de reducción acústica por debajo de lo que se puede esperar por las consideraciones de la ley de masa. A partir del valor de la frecuencia de cizalladura el índice de reducción acústica es de 4 a 6 dB inferior al previsto por la ley de masa. Es semejante a considerar que la pared de hormigón o ladrillo tiene la mitad de su masa real.

La frecuencia de cizalladura se puede calcular mediante la expresión [9]

$$f_{ciz} = \frac{c^2(1-\nu)}{59h^2.f_c} \quad Hz \qquad (5.15)$$

Los datos de mediciones acústicas del índice de reducción acústica de paredes gruesas de masa elevada muestran una zona plana en el índice de reducción acústica, opuesto a lo que ocurre en paneles donde generalmente hay una depresión característica en la curva del índice de reducción acústica.

Por ejemplo la frecuencia límite a la que se puede utilizar la teoría de las placas delgadas para una pared de hormigón de espesor 10 cm es 1750 Hz.

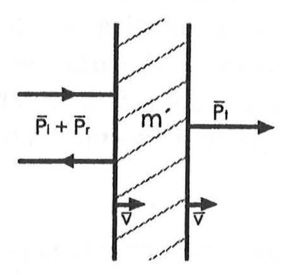
En la Tabla 5.1 se muestran los valores aproximados del producto de la frecuencia crítica y el espesor del material. f_c.h y factor de pérdidas internas de algunos materiales usuales en la construcción.

MATERIAL	Producto de la frecuencia crítica y el espesor del material. f_c.h, (m/s).	Factor de pérdidas internas, η
Acero	12,4	$1 - 6.10^{-4}$
Aluminio	12	10^{-4}
Cobre	17,8	2.10^{-3}
Hierro	17,5	$1 - 6.10^{-4}$
Latón	20	$< 10^{-3}$
Plomo	52	$0,5 - 2.10^{-3}$
Hormigón: denso,	17	$1 - 5.10^{-2}$
ligero,	33	
poroso	34	
Ladrillo, varía según el tipo	22 a 37	$1 - 2.10^{-2}$
Vidrio	12,7	$0,6 - 2 . 10^{-2}$
Yeso	34	$0,6 - 3.10^{-2}$
Madera	20 a 23	$0,8 - 1.10^{-2}$

Tabla 5.1: Producto de la frecuencia crítica y el espesor del material y su factor de pérdidas internas.

EJEMPLO: DEDUCCIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA A INCIDENCIA NORMAL DE UNA PARED DE UNA HOJA ILIMITADA

Se considera que una onda plana de frecuencia f incide perpendicularmente sobre una pared ilimitada delgada, parte de la energía acústica será reflejada y otra parte transmitida. Sean las presiones acústicas incidente, reflejada y transmitida respectivamente, en notación de números complejos, $\hat{p}_i; \hat{p}_r, \hat{p}_t$.



La pared es excitada por la diferencia de presión acústica entre las dos superficies de la pared, y la ecuación del movimiento de la pared por unidad de superficie es

$$(\hat{p}_i + \hat{p}_r) - \hat{p}_t = \hat{p} = m'\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} = im'\omega\hat{v}$$

m'es la masa por unidad de superficie de la pared, y $\hat{v}$ es la velocidad de la pared considerada como un sólido rígido sin vibración. La impedancia por unidad de área de la pared es: $\frac{\hat{p}}{\hat{v}} = im'\omega$

Si se asume que las velocidades de las partículas del aire adyacentes a la pared son iguales a la velocidad de la pared

$$\hat{v}_i + \hat{v}_r = v_t = \hat{v}$$

En el caso de ondas planas $\frac{\hat{p}}{\hat{v}} = Z = \rho c$

Se sustituye en la expresión de la igualdad de las velocidades

$$\frac{\hat{p}_i}{\rho c} - \frac{\hat{p}_r}{\rho c} = \frac{\hat{p}_t}{\rho c} = \hat{v}$$

$$\hat{p}_i - \hat{p}_r = \hat{p}_t = \rho c\hat{v} \quad \Rightarrow \hat{p}_r = \hat{p}_i - \hat{p}_t$$

Se despeja la velocidad de la pared y la presión del sonido reflejado de las ecuaciones anteriores, y se obtiene el valor de la presión acústica transmitida. Al sustituir en la primera ecuación

$$(\hat{p}_i + \hat{p}_r) - \hat{p}_t = im'\omega\hat{v}\,; \; (\hat{p}_i + \hat{p}_i - \hat{p}_t) - \hat{p}_t = im'\omega\hat{v}\,;$$

$$\hat{p}_t = \hat{p}_i - \frac{im'\omega\hat{v}}{2}\,; \qquad \frac{\hat{p}_t}{\rho c} = \hat{v}$$

$$\hat{p}_t = \hat{p}_i - \frac{im'\omega\hat{p}_t}{2\rho c}\,; \; \hat{p}_t = \frac{\hat{p}_i}{1 + \frac{i\omega m'}{2\rho c}}$$

Al sustituir en la definición de índice de reducción acústica se obtiene

$$R = 10.\log\frac{1}{\tau} = 10.\lg\frac{W_1}{W_2} = 10\lg\left|\frac{\hat{p}_i}{\hat{p}_t}\right|^2 = 10\lg\left|1 + i\frac{m'\omega}{2\rho c}\right|^2 = 10.\lg\left(1 + \frac{\pi^2 f^2 m'^2}{\rho^2 c^2}\right) \; dB$$

$$R = 20.\lg(m'f) + 20\lg\left(\frac{\pi}{\rho c}\right) \quad dB\,;$$

$$R = 20.\lg(m'f) - 42{,}4 \quad dB$$

Es la ley de masas teórica a incidencia normal, deducida por R. Berger

Este modelo tan sencillo, a pesar de no tener en consideración la elasticidad del sistema, pues considera que las masas no están unidas entre sí, aporta importantes conclusiones. Cada vez que se dobla la masa por unidad de superficie del sistema constructivo o la frecuencia del sonido incidente, el índice de reducción acústica aumenta 6 dB. Es decir, para mejorar el aislamiento a ruido aéreo es necesario utilizar materiales de elevada masa por unidad de superficie y que los sonidos de altas frecuencias se aíslan mejor que los de bajas frecuencias.

5.3.- ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES MONOLÍTICOS

Para los elementos estructurales monolíticos habituales el índice de reducción acústica en laboratorio, R, puede determinarse de manera muy precisa. En la Tabla 5.2 se muestran los valores del índice de reducción acústica calculado en bandas de octava para el caso de algunas estructuras monolíticas, según muestra la Norma EN 12354-1:2000. [10]

(Elementos monolíticos se llaman a las partes de una construcción o estructuras construidas en macizo continuo o de elementos, ligados firmemente entre sí.)

Construcción	Masa Kg/m^2	Índice de reducción acústica, dB en bandas de octava, Hz							$R_w(C,C_{tr})$
		63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	
120 mm de hormigón	276	35	34	36	46	54	62	69	49(-2,-6)
260 mm de hormigón	598	43	42	51	59	67	74	75	61(-1,-7)
110 mm de bloques de Ca-Si	193	34	34	33	39	49	58	65	44(-1,-4)
240 mm de bloques de Ca-Si	420	38	38	46	54	62	68	68	56(-1,-6)
120 mm de hormigón ligero	156	33	36	34	35	44	53	56	42(-1,-3)
300 mm de hormigón ligero	390	37	37	42	51	58	58	58	54(-2,-6)
100 mm de hormigón aireado fabricado en autoclave	65	26	30	31	27	32	41	45	32(0,-1)
200 mm de hormigón aireado fabricado en autoclave	130	30	30	29	34	43	46	46	39(-1,-3)

Tabla 5.2: Índice de reducción acústica calculado en bandas de octava para algunas estructuras monolíticas

Los índices globales se han calculado a partir de los valores en bandas de octavas según la Norma EN ISO 717-1.

Según la Norma citada anteriormente algunas de las propiedades típicas de los materiales son

Material	Densidad, ρ(kg/m^3)	Velocidad longitudinal c_L (m/s)	Factor de pérdidas internas η_{int}(-)
Hormigón	2300	3500	0,006
Silicato de Calcio	1750	2600	0,015
Hormigón ligero	1300	1700	0,015
Hormigón aireado fabricado en autoclave	650	1400	0,010

5.4.- ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE PONDERADO DE REDUCCIÓN ACÚSTICA PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES MONOLÍTICOS A PARTIR DE SU MASA POR UNIDAD DE SUPERFICIE.

La Norma EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos, muestra una expresión para calcular el índice ponderado de reducción acústica para elementos estructurales monolíticos.

De los resultados de las mediciones realizadas en los diferentes laboratorios europeos en los últimos 30 años, en los casos que no se disponga de datos de mediciones, para elementos homogéneos de una hoja construidos con ladrillos cerámicos, hormigón, bloques de silicato de calcio, bloques de yeso, hormigón aireado fabricado en autoclave y varios tipos de hormigón aligerado, puede utilizarse para estimar de forma aproximada el índice ponderado de reducción acústica R_w la siguiente expresión (EN 12354-1):

$$m' > 150 \text{ kg/m}^2 \qquad R_w = 37{,}5.\log (m'/m'_0) - 42 \text{ dB} \qquad (5.16)$$

$m'_0 = 1$ kg/m^2

Para los términos de adaptación espectral se considera:

C es aproximadamente constante, entre –1 y –2 dB.

$C_{tr} = 16 - 9.\log (m'/m'_0)$ dB, limitado por $-7 \leq C_{tr} \leq -1$ dB

$$m' > 150 \text{ kg/m}^2 \qquad R_A = R_w + C = 36.\log (m'/m'_0) - 40 \text{ dB}$$

$$m' > 150 \text{ kg/m}^2 \qquad R_{Atr} = R_w + C_{tr} = 33.\log (m'/m'_0) - 36 \text{ dB}$$

El mortero y el yeso utilizado pueden incluirse en la determinación de la densidad superficial. Cualquier elemento estructural con agujeros no puede ser considerado como homogéneo, a menos que la dimensión de los agujeros sea pequeña y que el volumen de los agujeros sea menos de un 15 % del volumen total. En consecuencia, la expresión anterior no puede aplicarse a tabiques de ladrillo hueco tan habituales en la construcción española.

Algunas *leyes de masa* empíricas obtenidas en algunos países europeos son las siguientes:

- Austria: $m' \geq 100\ kg/m^2$; $R_w = 32{,}4.\log(m'/m'_0) - 26{,}0$ dB
- Francia: $m' \geq 150\ kg/m^2$; $R_w = 40{,}0.\log(m'/m'_0) - 45{,}0$ dB, C = -1 dB
- Gran Bretaña: $m' \geq 50\ kg/m^2$; $R_w = 21{,}65.\log(m'/m'_0) - 2{,}3 \pm 1$ dB
- Alemania: $m' \geq 100\ kg/m^2$; $R_w = 31{,}7.\log(m'/m'_0) - 27{,}6$ dB

Según el DB HR Protección contra el ruido del CTE español. El Índice global de reducción acústica de un elemento constructivo, ponderado A, R_A es la valoración global, en dBA, del índice de reducción acústica, R, para un ruido incidente rosa normalizado, ponderado A.

En el citado DB HR se indica que los índices de reducción acústica se determinarán mediante ensayo en laboratorio. No obstante, y en ausencia de ensayo, puede decirse que el índice de reducción acústica proporcionado por un elemento constructivo de una hoja de materiales homogéneos, es función casi exclusiva de su masa y son aplicables las siguientes expresiones, ley de masa, que determinan el aislamiento R_A, en función de la masa por unidad de superficie, m´, expresada en kg/m^2:

$$m' \leq 150\ kg/m^2 \qquad R_A = 16{,}6.\lg(m'/m'_0) + 5\ \text{dBA} \qquad (5.17)$$

$$m' \geq 150\ kg/m^2 \qquad R_A = 36{,}5.\lg(m'/m'_0) - 38{,}5\ \text{dBA} \qquad (5.18)$$

donde $m'_0 = 1 kg/m^2$

El uso de las leyes de masa anteriores puede producir desviaciones de ± 2 dB, por lo que en los proyectos deberá tenerse en cuenta esta circunstancia.

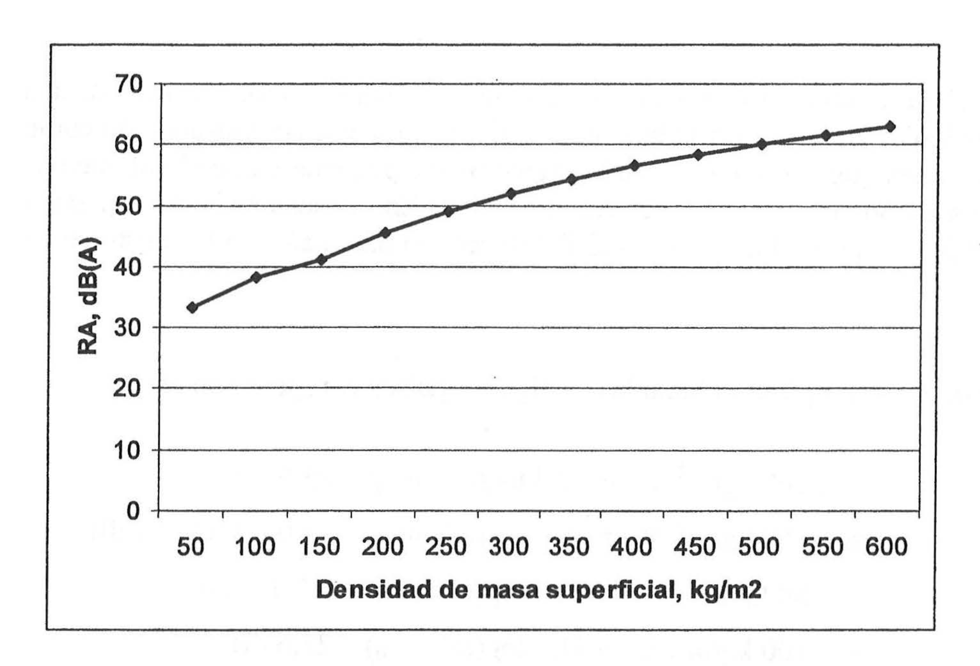


Figura 5.4: Ley de masas de sistemas constructivos monolíticos en España

Del análisis de los diferentes ensayos realizados en laboratorios acreditados ENAC de sistemas constructivos homogéneos de una hoja, habituales en España, se pueden proponen las siguientes leyes de masas del índice global de reducción acústica ponderado A, para ruido de automóviles. (Las expresiones siguientes no están en el DB HR Protección frente al ruido):

$m' < 150$ kg/m^2 $\quad R_{Atr} = 16{,}6.\lg (m'/m'_0) + 2$ dBA (5.19)

$m' \geq 150$ kg/m^2 $\quad R_{Atr} = 36{,}5.\lg (m'/m'_0) - 42{,}5$ dBA (5.20)

donde $m'_0 = 1$kg/m^2.

EJEMPLOS DE ÍNDICES DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO, R, DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS HOMOGÉNEOS DE UNA HOJA.

A continuación se muestran varios ejemplos del índice de reducción acústica de diferentes sistemas constructivos habituales.

La figura 5.5 muestra el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo de cuatro elementos constructivos de una hoja. Sus frecuencias críticas aproximadas son las siguientes: Tablero de yeso laminado, f_c = 2125 Hz; tablero de contrachapado de madera, f_c = 1388 Hz; pared de hormigón denso de espesor 10 cm, f_c = 190 Hz, Vidrio monolítico de espesor 4 mm , f_C = 3.200 Hz .

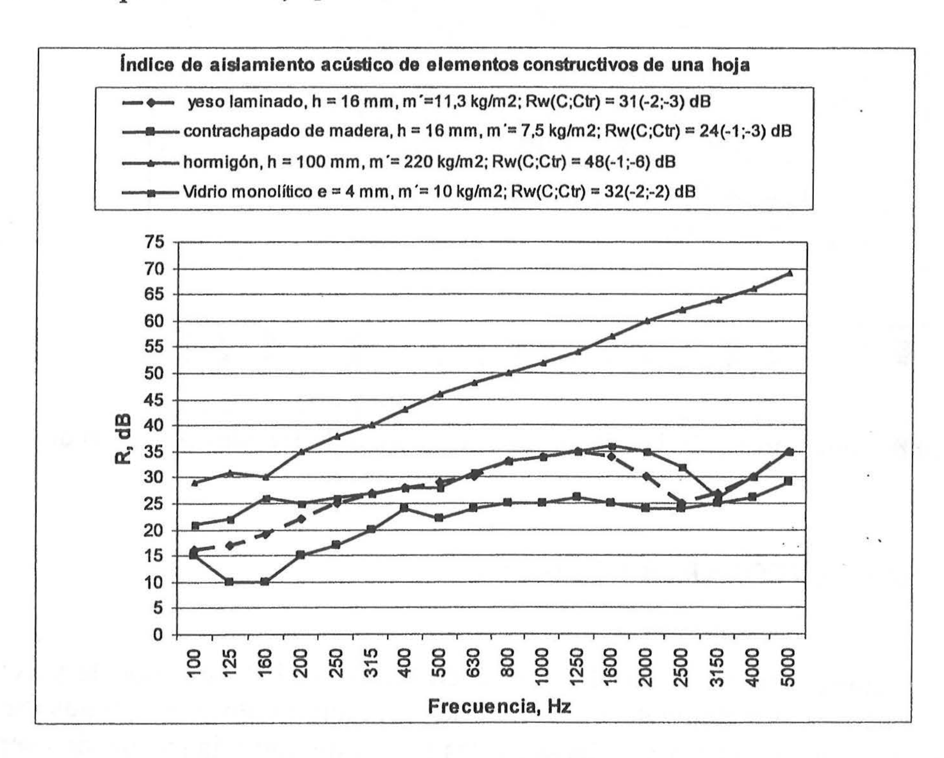


Figura 5.5: Índice de reducción acústica de cuatro elementos constructivos de una hoja.

PAREDES DE FÁBRICA DE LADRILLO CERÁMICO

En la figura 5.6 se exponen los resultados de diferentes paredes de fábrica de ladrillo cerámico de una hoja con uniones rígidas. Los ladrillos perforados son piezas de arcilla cocida en forma de paralelepípedo rectangular, tienen perforaciones paralelas a una de las aristas, el volumen de perforaciones varía del 5% al 33% del volumen total aparente de la pieza. En el caso de ladrillos huecos el volumen de los huecos supera el 33%.

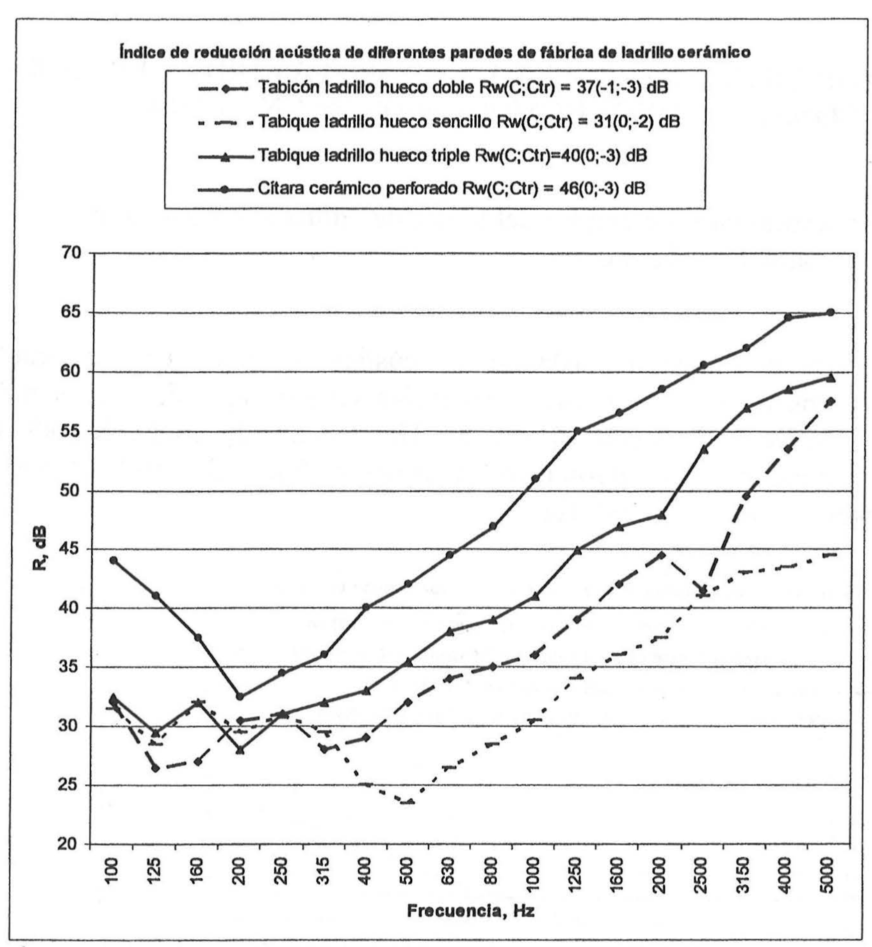


Figura 5.6: Índice de reducción acústica de paredes de fábrica de ladrillo cerámico de una hoja

FORJADOS, LOSAS ALVEOLARES Y MACIZAS.

Entre los sistemas constructivos de una hoja se encuentran los forjados, son la parte resistente de la cubierta o del elemento horizontal de separación entre los recintos. Se suelen clasificar en unidireccionales y reticulares, las piezas de entrevigado pueden ser cerámicas, de hormigón, de EPS (Poliestireno Expandido) de diferentes características, sin piezas de entrevigado. Los valores de la masa por unidad de superficie dependen de las características geométricas del forjado: distancia intereje (de 60 a 80 cm), espesor de la capa de compresión, ancho de nervio, etc.

Las losas de hormigón son vigas anchas respecto al canto. En las losas alveolares el porcentaje de huecos varía del 40 al 50% según el canto de la losa y pueden tener o no capa de compresión. En las losas macizas de hormigón armado hay que tener en cuenta el tipo de hormigón.

La figura 5.7 muestra los resultados de diferentes ensayos de laboratorio de forjados.

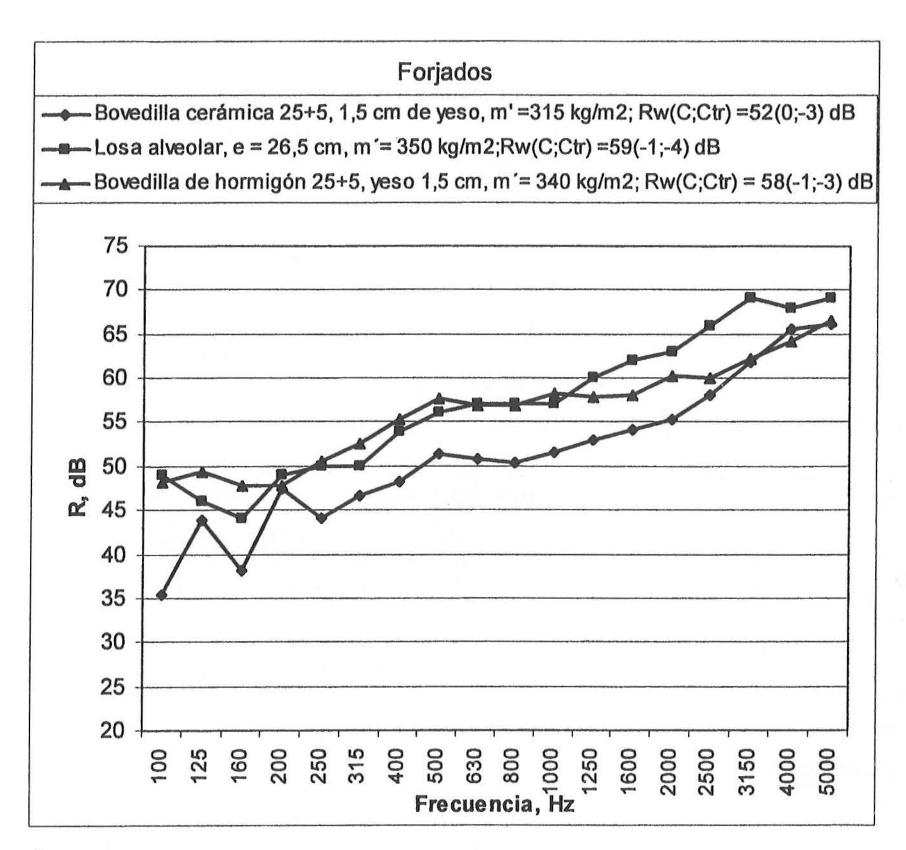
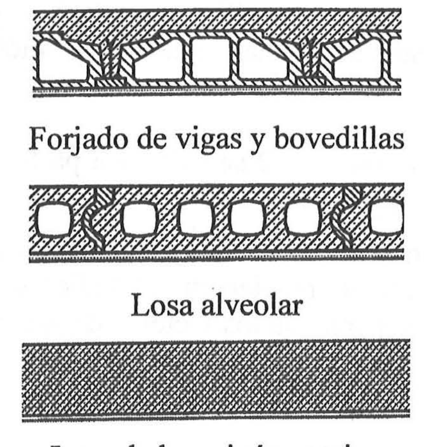


Figura 5.7: Índice de reducción acústica de diferentes tipos de forjados.



Losa de hormigón macizo

5.5.- MÉTODO EMPÍRICO APROXIMADO PARA ESTIMAR EL ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE UNA HOJA

En este apartado se expone un método empírico propuesto por Watters [11]. Este procedimiento permite estimar, en fase de proyecto, el índice de reducción acústica de un sistema constructivo de una hoja en bandas de octava. Consiste en aproximar por un segmento horizontal la región de coincidencia, para realizar la transición entre la región controlada por la masa y la controlada por el amortiguamiento. Es aplicable en sistemas de una hoja cuyas dimensiones largo y ancho sean al menos 20 veces el espesor de la hoja. La altura de la zona plana "plateau", R, en dB, y su anchura se muestran en la tabla adjunta.

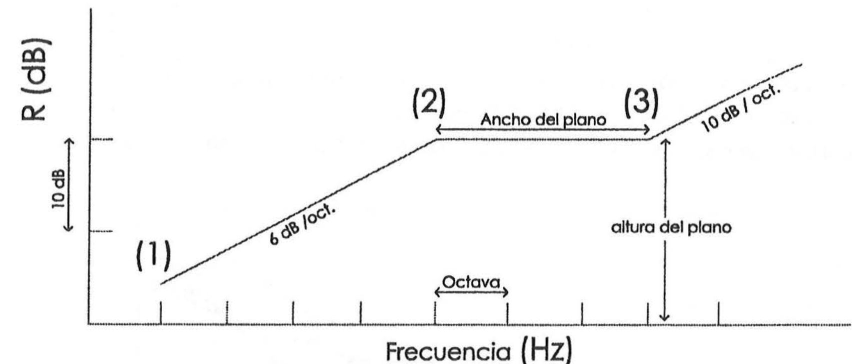


Figura 5.8: Gráfica para utilizar el procedimiento de Watters.

Material	Altura del plano, R_p, dB	Anchura del plano: f_2/f_1
Acero	40	11
Aluminio	29	11
Plomo	56	4
Bloque hueco de cemento y escorias	30	6,5
Hormigón denso	38	4,5
Ladrillo	37	4,5
Yeso	30	8
Vidrio	27	10
Madera contrachapada	19	6,5

Tabla 5.3: Altura y anchura de la zona plana en la aplicación del método de Watters.

Procedimiento:
El índice de reducción acústica en el tramo 1-2 se calcula a partir de la ley de masa a incidencia de campo. $R_{campo} = 20\lg(m' f) - 47{,}4 \quad dB$

En el tramo 2-3, zona plana, su altura y anchura se obtienen mediante la tabla 5.3.
A la derecha del punto 3 se hace una extrapolación. El índice de reducción acústica aumenta 10 dB por octava, aunque depende de los factores de amortiguamiento interno y en los bordes.

5.6.- PANELES LAMINADOS

Es habitual la utilización de paneles laminados de dos o más capas en la construcción para mejorar sus prestaciones mecánicas. Se considera un panel compuesto formado por dos paneles adheridos firmemente, sin una capa de aire de separación entre ellos. La figura siguiente muestra el sistema laminado, el panel 1 tiene un espesor h_1 y el panel 2 su espesor es h_2. El panel flexiona alrededor del eje neutro, donde δ es la distancia al eje neutro desde la superficie exterior del panel 1. El eje neutro está a una distancia

$$\delta = \frac{E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2)}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)} \qquad (5.21)$$

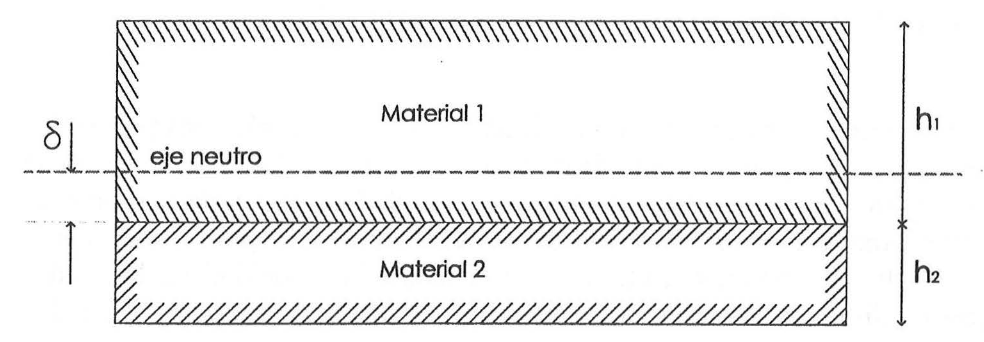


Figura 5.9: Esquema de un panel laminado y datos geométricos

La frecuencia crítica del panel laminado se obtiene mediante la fórmula

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m_{ef}'}{B_{ef}}} \quad Hz \tag{5.22}$$

Donde: $m_{ef}' = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2$, es la masa eficaz del panel laminado por unidad de superficie; B_{ef}, es la rigidez dinámica eficaz del panel laminado por unidad de anchura; ρ_1 y ρ_2 son las densidades de los materiales componentes del sistema laminado y E_1, E_2, ν_1, ν_2 sus módulos de Young y coeficientes de Poisson respectivamente; c es la velocidad del sonido en el aire.

La rigidez dinámica eficaz del panel laminado se puede calcular mediante la expresión

$$B_{ef} = \frac{E_1 h_1^3}{12(1-\nu_1^2)}\left[1+3(1-\frac{2\delta}{h_1})^2\right] + \frac{E_2 h_2^3}{12(1-\nu_2^2)}\left[1+3(1+\frac{2\delta}{h_2})^2\right] \quad \text{kg.m}^2/\text{s}^2 \tag{5.23}$$

En la ecuación anterior el signo algebraico de δ se debe mantener. Es positivo cuando su valor está en el material 1.

Para calcular el índice de reducción acústica, en la zona inferior a la frecuencia crítica se aplica la ecuación (5.9). Por encima de la frecuencia crítica se aplica la ecuación (5.13).

El factor de amortiguamiento del sistema laminado puede obtenerse de la ecuación

$$\eta = \frac{(\eta_1 E_1 h_1 + \eta_2 E_2 h_2)(h_1 + h_2)^2}{E_1 h_1^3\left[1+3(1-\frac{2\delta}{h_1})^2\right] + E_2 h_2^3\left[1+3(1+\frac{2\delta}{h_2})^2\right]} \tag{5.24}$$

5.7.- TRANSMISIÓN DEL SONIDO EN PLACAS ORTÓTROPAS.

La transmisión del sonido en placas ortótropas difiere de las placas isótropas porque las primeras tienen diferente rigidez en sus direcciones principales. La diferencia en la rigidez de flexión para una placa ortótropa puede resultar de la anisotropía del material de la placa, tales como la madera, o de la construcción de la placa tales como ondulaciones, nervaduras, estampado, etc. en consecuencia la velocidad de las ondas libres de flexión es diferente para las dos direcciones y la placa ortótropa tiene dos frecuencias de coincidencia dadas por:

$$f_{c1} = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B_x}} \quad Hz \quad , \quad f_{c2} = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B_y}} \quad Hz \qquad (5.25)$$

$$B_y = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} Nm \quad , \quad B_x = B_y(\frac{s}{s'})\ Nm \qquad (5.26)$$

s es la longitud entre dos máximos de las ondulaciones a lo largo de la superficie y s′ la distancia entre los dos máximos.

Desde el punto de vista estructural el comportamiento de las placas corrugadas presenta ventajas respecto a las chapas planas, pero desde el punto de vista acústico el índice de reducción acústica de las placas corrugadas es mucho menor que el e las chapas planas de igual espesor.

El índice de reducción acústica R puede ser calculado de forma aproximada mediante las expresiones [12], [13]. Se considera que el factor de pérdidas es $\eta = 0$.

Se utilizan las ecuaciones:

$$f < f_{c1} \quad R_{campo} = 20\lg(m' f) - 47{,}4 \quad dB$$

$$f_{c1} \le f < 0{,}5 f_{c2} \quad R = 20\log f + 10\log m' - 10\log f_{c1} - 20\log\left[Ln\left(\frac{4f}{f_{c1}}\right)\right] - 13{,}2\ dB \qquad (5.27)$$

$$f > 2f_{c2} \qquad R = 20\log f + 10\log m' - 5\log f_{c1} - 5\log f_{c2} - 23 \quad dB \qquad (5.28)$$

Entre $0{,}5f_{c2}$ y $2f_{c2}$, R se estima uniendo los puntos con un segmento rectilíneo en un gráfico en función del logaritmo decimal de la frecuencia. El procedimiento se aplica de la misma forma en el intervalo de frecuencias $f_{c1}/2$ y f_{c1}.

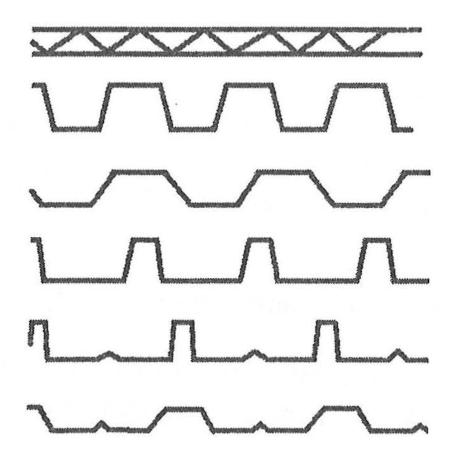


Figura 5.10: Ejemplo de chapas conformadas onduladas, grecadas y nervadas.

Hay dos consideraciones a tener en cuenta cuando se utilizan las expresiones anteriores del índice de reducción sonora R para placas ortótropas:

- En paneles ondulados habituales, entre 2000 y 4000 Hz hay un descenso en los valores de R de hasta 5 dB, en los valores medidos respecto a los previstos en la teoría.

- En paneles de pequeñas dimensiones, el índice de reducción sonora R es subestimado por debajo de alrededor de $0,7f_{c1}$.

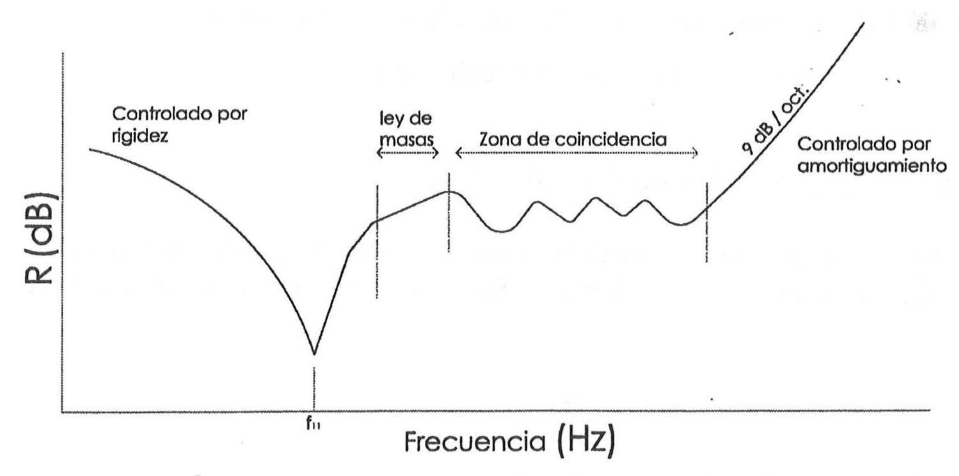


Figura 5.11: Índice de reducción acústica de un panel ortótropo y su intervalo de frecuencias críticas.

La figura 5.12 muestra los resultados de las mediciones en laboratorio del índice de reducción acústica R de dos placas de acero, una plana de masa por unidad de superficie 8 kg/m^2 con valores globales R_A = 31,5 dBA, R_{Atr} = 27,4 dBA; la otra ondulada de masa por unidad de superficie 11 kg/m^2 y valores globales R_A= 21,8 dB; R_{Atr} = 19,3 dBA.

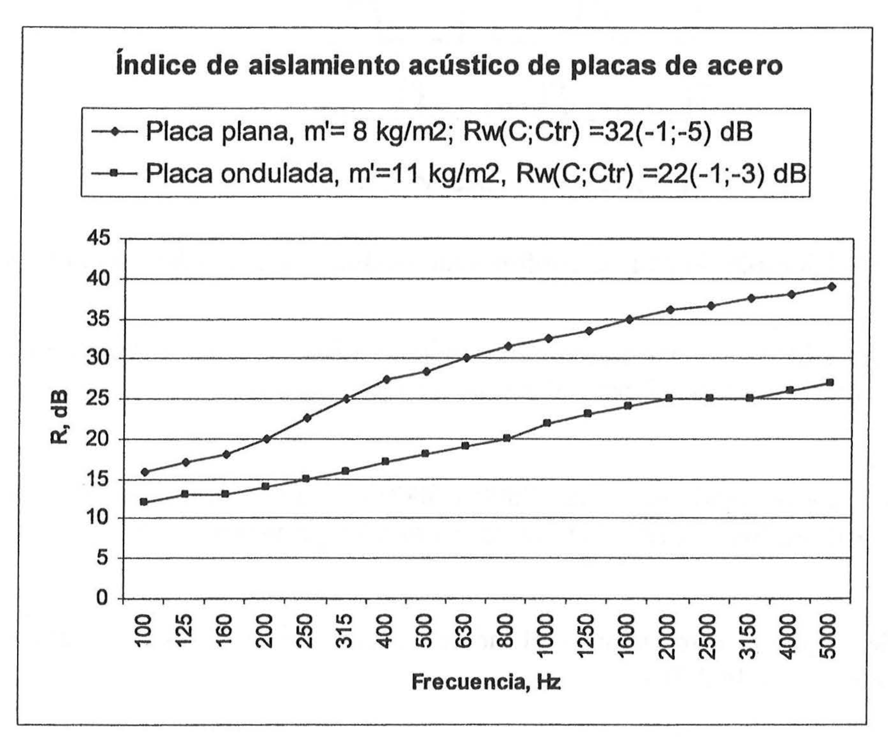


Figura 5.12: Comparación del índice de reducción acústica de placas de acero planas y onduladas.

5.7.1.- PANELES CON NERVADURAS RIGIDIZADAS

Los paneles pueden tener nervaduras añadidas para aumentar la rigidez del panel y reducir las tensiones ante las cargas aplicadas. Son un caso particular de sistemas ortótropos, [14].

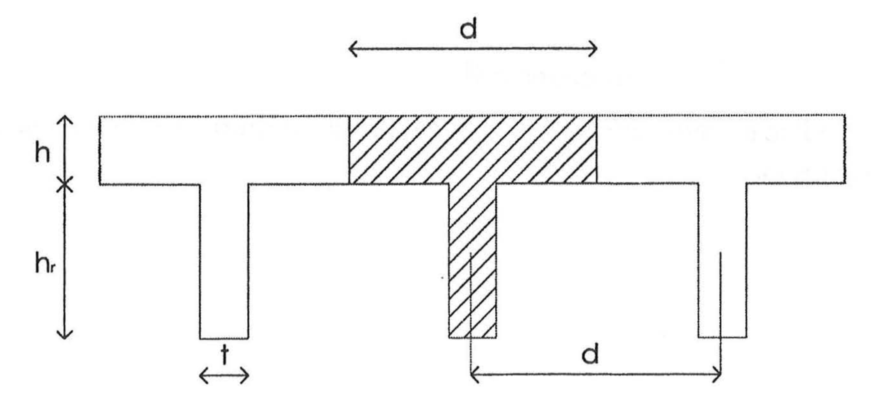


Figura 5.13: Esquema de un panel con nervaduras rigidizadas.

La masa por unidad de superficie se obtiene de la expresión

$$m' = \rho h\left[1 + \left(\frac{h_r}{h}\right)\left(\frac{t}{d}\right)\right] \quad kg/m^2 \tag{5.29}$$

Las dos frecuencias de coincidencia para este sistema ortotrópico son

$$f_{c1} = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B_1}}; \qquad f_{c2} = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B_2}}$$

donde

$$B_1 = \frac{EI}{d} \tag{5.30}$$

I es el momento de inercia respecto al eje neutro de la sección en T sombreada en la figura y d es la distancia centro a centro entre las nervaduras.

$$B_2 = \frac{Eh^3}{12\left\{1 - \frac{t}{d} + \frac{\frac{t}{d}}{\left[1 + \frac{h_r}{h}\right]^3}\right\}} \tag{5.31}$$

El índice de reducción acústica se determina según las expresiones del apartado anterior.

5.8.- MEJORA DEL ÍNDICE PONDERADO DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE RECUBRIMIENTOS.

La mejora del índice de reducción acústica debida a un recubrimiento tales como trasdosados montados elásticamente, suelos flotantes, o techos suspendidos, es en principio diferente a una transmisión por flancos y a una transmisión directa, y depende del tipo de elementos básicos estructurales a los que se apliquen [5].

Si los recubrimientos se fijan a un elemento estructural básico homogéneo (elemento separador o elemento flanco) el aislamiento acústico a ruido aéreo puede aumentar o disminuir dependiendo de la frecuencia de resonancia del sistema, f_0.

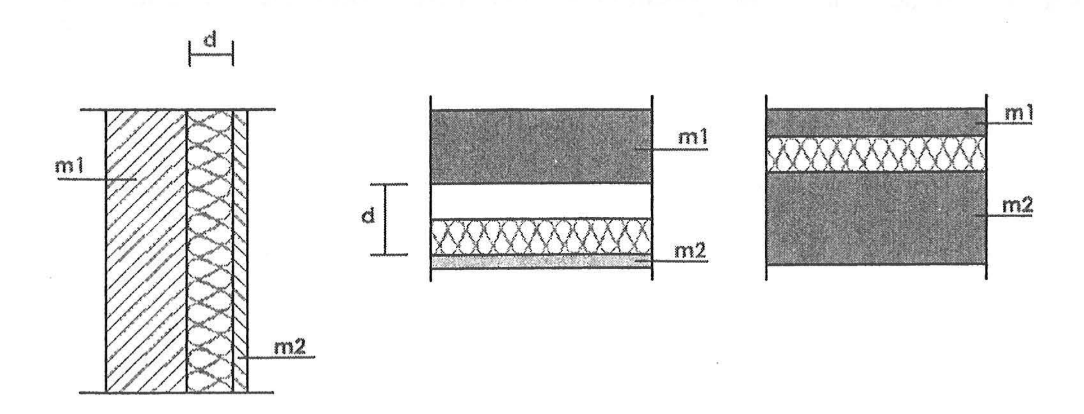


Figura 5.14: Ejemplos de recubrimientos trasdosados, techos suspendidos, y suelos flotantes

1) Para elementos en los que el recubrimiento se fija directamente al elemento estructural básico homogéneo (elemento separador o elemento de flanco), sin rastreles ni perfiles, la frecuencia de resonancia se calcula mediante la expresión:

$$f_0 = 160\sqrt{s'\left(\frac{m_1' + m_2'}{m_1'.m_2'}\right)}\ Hz \qquad (5.32)$$

donde

s', es la rigidez dinámica de la capa aislante, $s' = \frac{E_{din}}{s}\ \frac{MN}{m^3}$;

m'_1, es la densidad superficial del elemento estructural básico, kg/m^2;

m'_2, es la densidad superficial del recubrimiento, kg/m^2

3) Para recubrimientos realizados con montantes de metal o madera, o perfiles no conectados directamente al elemento estructural básico, en los que la cavidad se rellena con una capa aislante porosa de resistividad al aire, r ≥ 5 kPa.s/m^2. La frecuencia de resonancia f_0, se calcula mediante:

$$f_0 = 160\sqrt{\frac{0{,}111}{d}\left(\frac{m_1' + m_2'}{m_1'.m_2'}\right)}\ Hz \qquad (5.33)$$

donde d, es la profundidad de la cámara, en m.

Para elementos estructurales básicos con un índice ponderado de reducción acústica en el intervalo de valores $20 \leq R_w \leq 60$ dB, la mejora del índice ponderado de reducción acústica resultante como consecuencia del recubrimiento se puede estimar a partir de la frecuencia de resonancia f_0, redondeando al número entero más próximo, según los valores de la Tabla 5.4. Es importante observar que para frecuencias de resonancia superiores a 200 Hz se produce una disminución del índice ponderado de reducción acústica.

Frecuencia de resonancia f_0 del recubrimiento, Hz	ΔR_w , dB
≤ 80	35 – (R_w/2)
100	32 – (R_w/2)
125	30 – (R_w/2)
160	28 – (R_w/2)
200	- 1
250	- 3
315	- 5
400	- 7
500	- 9
630 – 1600	- 10
> 1600	- 5
1.- Si $f_0 < 200$ Hz, el valor mínimo de ΔR_w es 0 dB.	
2.- Pueden deducirse valores intermedios de las frecuencias de resonancia mediante interpolación del log f_0	
3.- R_w es el índice ponderado de reducción acústica del elemento estructural sin recubrimiento, en dB.	

Tabla 5.4: Mejora del índice ponderado de reducción acústica de un recubrimiento, en función de la frecuencia de resonancia.

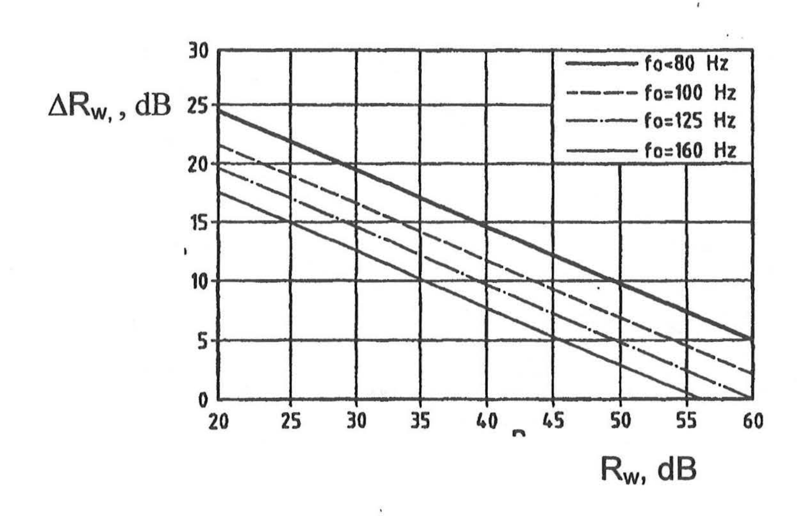


Figura 5.15: Mejora del índice ΔR_w por un recubrimiento con frecuencia de resonancia inferior a 200 Hz, en función del índice R_w de un elemento estructural desnudo.

De la tabla 5.4 se puede concluir que para frecuencias de resonancia inferiores a 200 Hz, la mejora del índice ponderado de reducción sonora del sistema será mayor cuanto menor sea el índice de reducción sonora del sistema original sin recubrimiento.

5.9.- ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE MATERIALES POROSOS

Los materiales absorbentes acústicos de tipo poroso por si mismos no tienen un buen comportamiento en el aislamiento acústico a ruido aéreo, su índice de reducción acústica es muy bajo.

El revestimiento interior de las paredes de un recinto con materiales absorbentes porosos sirve para controlar el sonido reverberante y aumentar el índice de reducción acústica de las paredes a altas frecuencias. Por otra parte la colocación de estos materiales en la cavidad entre dos hojas aumenta de forma importante el índice de reducción acústica R del sistema. La colocación de fibra mineral entre el suelo flotante y el suelo estructural aumenta el índice de aislamiento a ruido aéreo y reduce el nivel de la presión a ruido de impactos de los elementos horizontales de separación entre recintos. En la figura 5.16 se muestran los resultados del índice de reducción sonora de lana de roca de densidad 50 kg/m^3 para diferentes espesores.

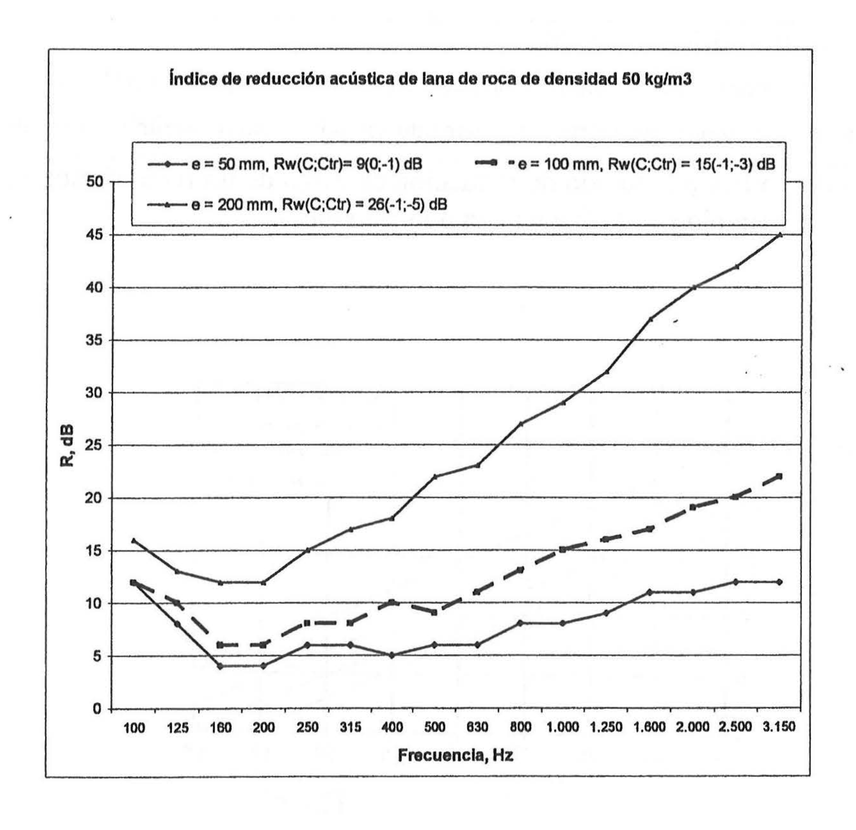


Figura 5.16: Índice de reducción acústica de lana de roca de diferentes espesores

Cuanto más poroso es el material menor es su aislamiento al ruido aéreo, este aumenta al hacerlo la resistividad al flujo de aire, magnitud que depende fundamentalmente de la densidad y el tamaño de la fibra.

5.10.- EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LOS ELEMENTOS MIXTOS.

Es habitual que las fachadas, particiones de los recintos, etc. estén compuestas por elementos constructivos diferentes. Cada uno de los elementos está caracterizado por un índice de reducción acústica. Por ejemplo fachadas con ventanas y/o balcones, paredes con puertas, cubiertas con claraboyas, etc. Las paredes o cerramientos suelen tener aberturas, aparte de ventanas y puertas, tales como orificios de ventilación, paso de canalizaciones, grietas, etc.

Para obtener una expresión del índice de reducción acústica de un elemento mixto, consideramos una pared de área S m^2, constituida por un elemento de área S_1 m^2 e índice de reducción acústica R_1, dB y otro elemento de área S_2 m^2 e índice de reducción acústica R_2, dB. El aislamiento mixto de la pared dependerá de las diferencias entre R_1 y R_2, de las relaciones entre las áreas parciales S_1 y S_2 y el área total S.

Cuando en el recinto emisor la energía acústica es la misma y la transmisión es directa, la pared que separa los recintos emisor y receptor transmite energía acústica proporcionalmente a su área. En nuestro caso, el coeficiente de transmisión resultante es:

$$\tau_m(S_1 + S_2) = \tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 \qquad (5.34)$$

$$\tau_m = \frac{S_1}{S}\tau_1 + \frac{S_2}{S}\tau_2 \qquad (5.35)$$

De la definición del índice de reducción acústica se puede deducir el coeficiente de transmisión de cada elemento

$$R_i = 10\lg\frac{1}{\tau_i} \quad dB$$

$$\tau_i = 10^{-0,1R_i}$$

El índice de reducción acústica mixto la pared es

$$R_m = 10\lg\frac{1}{\tau_m} = -10\lg\left(\frac{S_1}{S}.10^{-0,1R_1} + \frac{S_2}{S}.10^{-0,1R_2}\right) \ dB \qquad (5.36)$$

En general el índice de reducción acústica mixto de una partición de n elementos diferentes, puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$R_m = -10.\lg\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} S_i.10^{-0,1R_i}}{\sum_{i=1}^{n} S_i}\right) \quad dB \qquad (5.37)$$

S_i es el área del elemento constructivo i, en m^2, y R_i es el índice de reducción acústica del elemento constructivo de área S_i,, en dB. Esta expresión se puede utilizar tanto en bandas de frecuencia, como para índices globales.

El índice de reducción acústica de un sistema constructivo mixto está condicionado por el índice de reducción acústica del elemento constructivo más débil. De aquí la gran

importancia de lograr soluciones constructivas equilibradas y el evitar aberturas y grietas en los cerramientos. Cuando hay que mejorar el índice de reducción acústica de un sistema constructivo mixto hay que comenzar por mejorar el índice de reducción acústica del elemento constructivo más débil.

Se deja como ejercicio para el lector, el probar que cuando el sistema constructivo mixto consta únicamente de dos elementos de índice de reducción acústica diferentes, la expresión del índice de reducción acústico mixto se puede escribir:

$$R_m = R_2 - 10.\lg\left((1-\frac{S_2}{S}).10^{-0,1(R_1-R_2)} + \frac{S_2}{S}\right) \quad dB \qquad (5.38)$$

R_m, es el índice de reducción acústica del elemento constructivo mixto, R_1 el índice de reducción acústica del elemento constructivo de mayor aislamiento acústico, generalmente la parte ciega de la fachada, R_2 el índice de reducción acústica del elemento constructivo de menor aislamiento acústico, generalmente ventanas, puertas, lucernarios, etc; los tres índices en dB; S el área total del elemento constructivo mixto, S_2,, el área del elemento de menor aislamiento acústico, las dos áreas en m^2. El índice de reducción acústica del elemento constructivo mixto es como máximo 10 dB mayor que el elemento constructivo de menor índice de reducción acústica.

EJEMPLO

La fachada de un recinto está orientada a una calle con ruido de tráfico. Está formada por una parte ciega de área 8 m^2 e índice ponderado de reducción acústica R_{Atr} = 43 dBA, y una ventana de clase 3, sin cajón de persiana, de área 2 m^2 e índice ponderado de reducción acústica R_{Atr} = 25 dBA. Hállese el índice ponderado de reducción acústica de la fachada. En la misma fachada se duplica el área de la ventana, ¿cuál es el nuevo índice ponderado de reducción acústica?

SOLUCIÓN

$$R_{m,Atr} = -10.\lg\left[(\frac{S_v}{S_f}).10^{-0,1R_v} + (\frac{S_c}{S_f}).10^{-0,1R_c}\right] \quad dB$$

$$R_{m,Atr} = -10.\lg\left[(\frac{8}{10}).10^{-4,3} + (\frac{2}{10}).10^{-2,5}\right] = 31,7\ dB \cong 32\ dB$$

Si se duplica el área de la ventana, el índice de reducción acústica de la ventana disminuye en 1 dB, R_{Atr} = 24 dBA.

$$R_{m,Atr} = -10.\lg\left[(\frac{6}{10}).10^{-4,3} + (\frac{4}{10}).10^{-2,4}\right] = 27,9\ dB\ dB$$

Al doblar el área de la superficie acristalada, el índice ponderado de reducción acústica de la fachada se reduce aproximadamente en 4 dB.

Cuando en la fachada de un recinto el área de la superficie acristalada es un porcentaje elevado del área de la fachada, el índice de aislamiento acústico de la fachada, depende básicamente del índice de reducción acústica del cerramiento del hueco.

5.11 - INFLUENCIA DE AGUJEROS, GRIETAS, FISURAS EN EL ÍNDICE DE REDUCCIÓN ACÚSTICA DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO.

En los cerramientos de un recinto puede haber una importante disminución del aislamiento acústico a ruido aéreo debido a aberturas, grietas y fisuras.

El aislamiento acústico global de un cerramiento está muy condicionado por el área de la zona por donde se producen escapes del sonido. Cuanto mayor sea el aislamiento acústico del sistema constructivo, es más importante eliminar las zonas por donde se pueda escapar la energía sonora. Por eso es tan importante el sellado de las tuberías que atraviesan las paredes, sellado del perímetro de divisorios de obra en seco, eliminar las grietas alrededor de los bordes de puertas y ventanas, colocar adecuadamente burletes en puertas y ventanas, desalinear las tomas de corriente en las paredes, etc.

El índice de reducción acústica de un agujero es muy próximo a 0 dB, y aunque su área sea muy pequeña tiene una gran influencia en el índice de reducción acústica de la pared. La figura 5.17 muestra los efectos producidos por huecos, grietas y fisuras sobre el índice de reducción acústica ponderado en una pared. En la gráfica aparece el porcentaje que representan los huecos en el total de la pared.

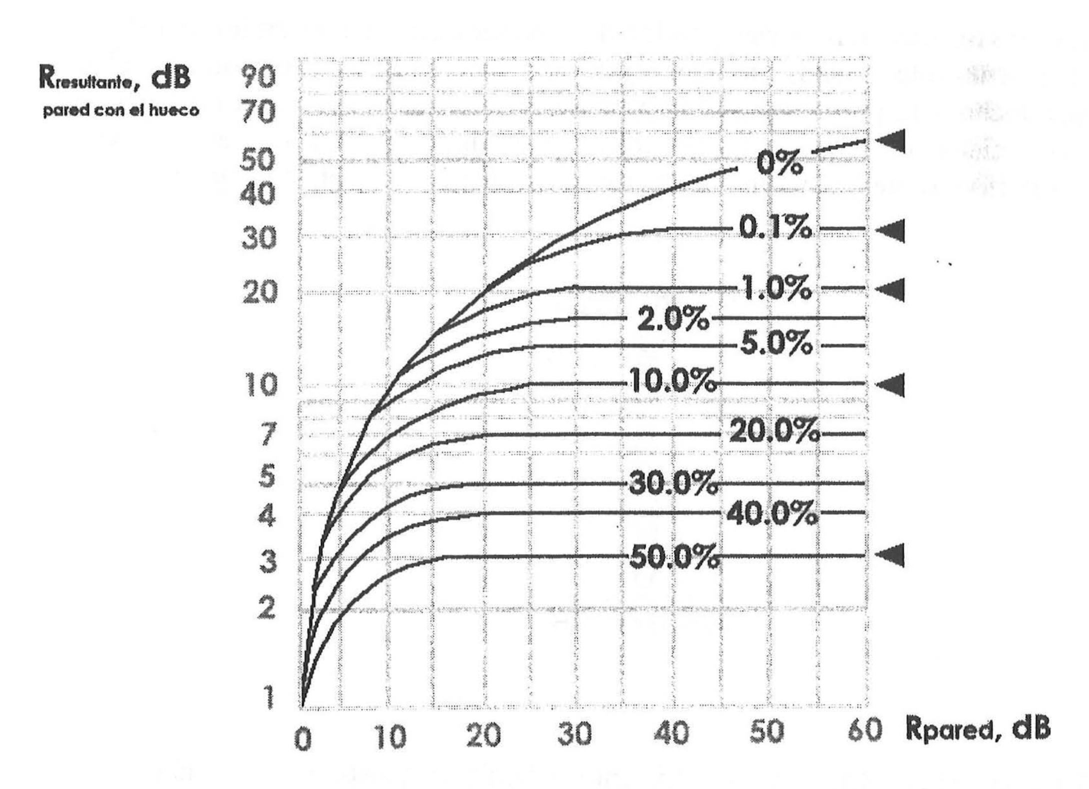


Figura 5.17: Efectos de los huecos en el índice de reducción acústica de una pared.

Generalmente los resultados de los ensayos del índice de reducción acústica de paredes de fábrica realizados en laboratorio se obtienen con las superficies recubiertas con buenos enlucidos de yeso o cemento. En la realización de una pared, es usual que queden huecos cuando únicamente existe el mortero de cemento entre los ladrillos. El guarnecido de al menos una de las caras de la pared mejora de forma muy importante el

aislamiento al ruido aéreo. En la figura 5.18 se muestran los resultados del efecto del guarnecido de una pared de ladrillo hueco doble. Cuando las caras de la pared no están guarnecidas el índice global de reducción acústica ponderado A es R_A = 26 dBA, cuando están guarnecidas R_A = 37 dBA.

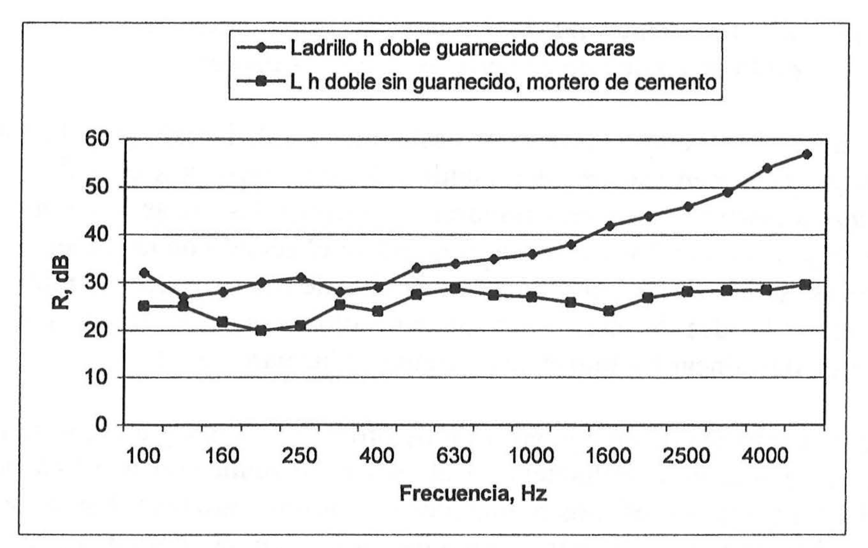


Figura 5.18: Influencia en el índice de reducción acústica de una pared del guarnecido.

Unos recintos en los que se nota está pérdida de reducción acústica es en los cuartos de baño que tienen un falso techo, este con rejilla de ventilación. El alicatado se realiza hasta el falso techo y la pared separadora entre el falso techo y el forjado no tiene los ladrillos guarnecidos, ni tampoco las bovedillas. Ver figura 5.19. En general en este sistema constructivo se generan importantes ruidos estructurales al abrir los grifos.

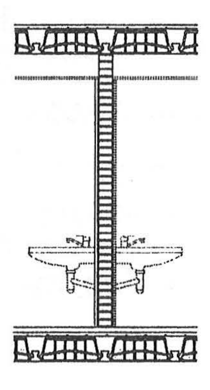


Figura 5.19: Sistema constructivo con deficiente aislamiento acústico a ruido aéreo.

Otro ejemplo de situaciones en las que puede haber una disminución del aislamiento acústico a ruido aéreo de un sistema constructivo, se muestra en la figura 5.20. Las tomas de corriente, interruptores, cajas de registro, etc. están colocados en el mismo elemento de separación vertical, en diferentes recintos y son coincidentes.

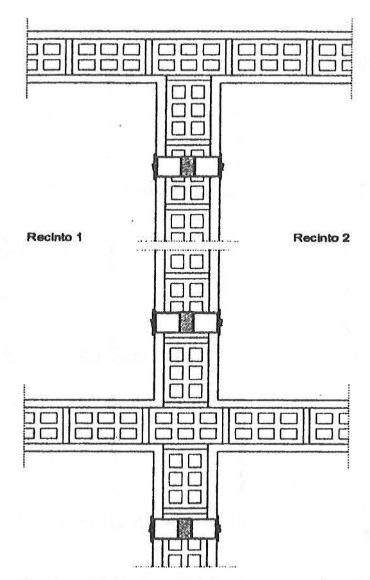


Figura 5.20: Ejemplo de montaje incorrecto de tomas de corriente.

5.12.- LOS ENSAYOS DE LABORATORIO Y SU REPRODUCIBILIDAD

Los sistemas constructivos utilizados en la construcción tienen que cumplir unos valores mínimos del índice de reducción acústica de acuerdo con la legislación correspondiente, que deben aportar los fabricantes. Los valores del índice de reducción acústica se suelen determinar en ensayos realizados en cámaras construidas para tal fin, de acuerdo con las exigencias de las Normas UNE EN ISO 140 [15], correspondientes, en laboratorios acreditados.

En los recintos de los laboratorios de acústica es posible controlar en parte las condiciones del campo sonoro. En estos recintos el campo sonoro puede aproximarse al modelo ideal del campo sonoro difuso. Sin embargo, en los recintos habituales en edificios de uso residencial, de oficinas, etc. el modelo del campo sonoro difuso no es habitual.

En la figura 5.21 se muestran las secciones de diferentes modelos de cámaras de transmisión horizontal en los que se realizó un trabajo de intercomparación entre laboratorios [16].

A pesar de la importancia del aislamiento acústico en el intervalo de las bajas frecuencias es difícil conseguir una adecuada repetibilidad y reproducibilidad en las mediciones acústicas. En la figura 5.22 se exponen los resultados de los ensayos de reproducibilidad, comparando resultados de medidas acústicas sobre la misma muestra de ensayo, estos evidencian que la desviación estandar llega a ser muy grande si el factor de pérdidas no está controlado adecuadamente. La muestra objeto de ensayo era una pared de masa por unidad de superficie 440 kg/m^2 y los valores globales R_w obtenidos estaban en un rango de 54 a 61 dB. La causa principal de las diferencias en los valores obtenidos es el tipo de construcción de las cámaras de transmisión.

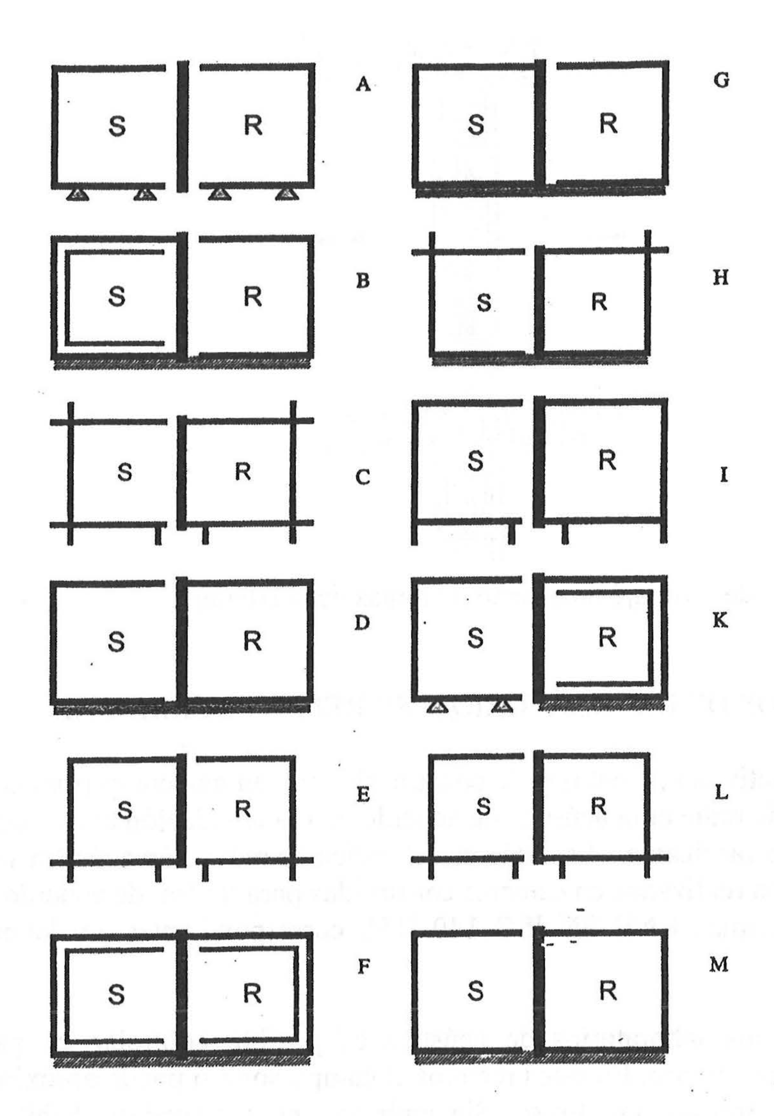


Figura 5.21: Diferentes tipos de cámaras de transmisión horizontal para la realización de ensayos del índice de reducción acústica.

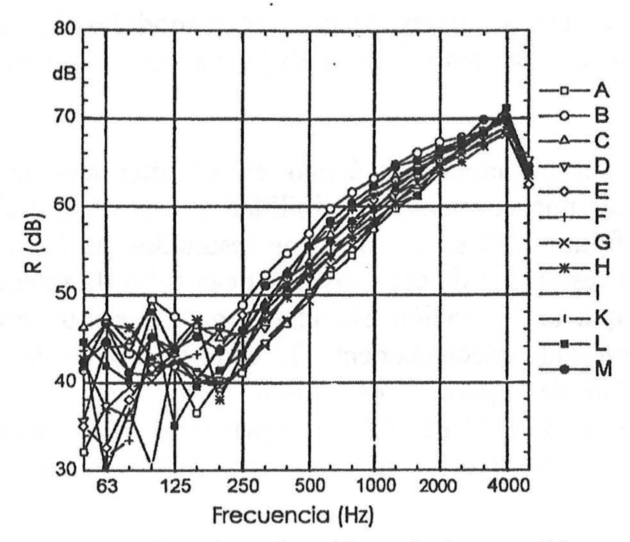


Figura 5.22: Ensayos del índice de reducción acústica en diferentes laboratorios sobre la misma muestra de ensayo.

Nota: La repetibilidad y la reproducibilidad son conceptos de precisión. (ISO 5725)
Precisión: la proximidad entre los resultados de ensayo, independientes ente sí, obtenidos bajo unas condiciones prescritas.
Repetibilidad: La proximidad entre resultados de ensayo independientes entre sí, obtenidos, bajo condiciones de repetibilidad.
Condiciones de repetibilidad: Condiciones en las que se obtienen resultados de ensayo, independientes entre sí, mediante el mismo método, sobre el mismo material, en el mismo laboratorio, con el mismo equipo, por el mismo operador, en un intervalo de tiempo pequeño.
Reproducibilidad: La proximidad entre resultados de ensayo obtenidos bajo condiciones de reproducibilidad.
Condiciones de reproducibilidad: Condiciones en las que se obtienen resultados de ensayo, independientes entre sí, mediante el mismo método, sobre le mismo material, en el diferentes laboratorios, por diferentes operadores usando diferente equipamiento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] BERANEK, L., Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2006.
[2] CREMER; HECKL, UNGAR. Structure Borne Sound. Springer Verlag, Berlín, 1988
[3] Josse, R; Lamure, J. "Transmission du son par une paroi simple", Acústica 14 (1964), 266-280.
[4] FAHY,F. Sound and Structural Vibration, Academic Press, London, 1994
[5] UNE-EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.
[6] Sewell, E.C; Transmisssion of reverberant sound through a single leaf partition sourrunded by an infinite baffle. J. Sound and Vibration, 12, (1970), 21-32.
[7] Mindlin, R.D. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motion of isotropic plates. J. Appl. Mech. ,**18**, (1951), 31-38.
[8] Rindell, J.H. Dispersion and absorption of structure-borne sound in acoustically thick plates, Applied Acoustics, 41, (1994), 97-111.
[9] Long, M. Architectural Acoustics, Elsevier Academic Press, 2006.
[10] EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.

[11] Watters B.G.. Transmission Loss of Some Masonry Walls, J.A.S.A. 31(7) (1959), 898-911.
[12] Heckl, M.Untersuchungen an orthotropen platten (Investigations of orthotropic plates). Acústica, 10, (1960),109-115.

[13] Hansen, C. Sound transmission loss of corrugated panels. Noise Control Eng.J., 40, (1993), 187-197.
[14] Maidanik. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. JASA 34;(1962), 640-647

[15] UNE-EN ISO 140-3:-Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción.
[16] Meier, A.; Schmitz, A.; Raabe, G. Inter-laboratory test of sound insulation measurements on heavy walls. Part I and II. Journal of Building Acoustics, 6 (1999), 159-186.

NOTAS

NOTAS

NOTAS

CUADERNO

296.01

cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

